

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Trpimir Barun

Zagreb, 2009.

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Mentor

Prof. dr.sc. Zoran Kožuh

Trpimir Barun

Zagreb, 2009.

## **ZAHVALA**

Ovom prilikom želio bih zahvaliti prof.dr.sc Slobodanu Kralju na podršci i razumjevanju tijekom studija, mentoru prof.dr.sc. Zoranu Kožuhu, mr. Šimunu Andriću, laborantima Mati Šokčiću, Zdenku Batiniću, Krešimiru Sukobljeviću na pomoći prilikom izvođenja eksperimenta, prof.dr.sc. Ciglaru i Katedri za alatne strojeve na izradi uzoraka za zavarivanje i ispitivanje te gospođi Miri Škugor na administrativnoj pomoći.

Posebna zahvala dr. Ivici Garašiću na uputama, stručnoj pomoći i strpljenju. Također se zahvaljujem svojoj Ivani koja me motivirala, na svoj, jedinstven način.

Svoj diplomski rad posvećujem svojim roditeljima koji su uspjeli, svojim žrtvovanjem, omogućiti mi studiranje, a time i kvalitetniji život.

## **SADRŽAJ**

<b>SAŽETAK</b>	<b>I</b>
<b>IZJAVA</b>	<b>II</b>
<b>POPIS OZNAKA</b>	<b>III</b>
<b>POPIS SLIKA</b>	<b>IV</b>
<b>POPIS TABLICA</b>	<b>V</b>
<b>1. UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2. PREGLED I ANALIZA DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA I SPOZNAJA</b>	<b>4</b>
2.1. Stanje i trendovi u razvoju podvodnog zavarivanja	4
2.2. Razvoj podvodnog mokrog zavarivanja	5
2.3. Tehnike podvodnog zavarivanja	11
2.3.1. Suho podvodno zavarivanje	11
2.3.1.1. Podvodno zavarivanje u suhim komorama (zvono, mini habitatu)	11
2.3.1.2. Podvodno zavarivanje u habitatima (hiperbaričko zavarivanje)	12
2.3.1.3. Podvodno zavarivanje pri normalnom atmosferskom tlaku	13
2.3.2. Mokro podvodno zavarivanje	13
2.3.2.1. Priprema zavarivanja	16
2.3.2.2. Tehnika "self-consuming"	17
2.3.2.3. Horizontalni položaj zavarivanja	17
2.3.2.4. Vertikalni nadglavni zavari	18
2.3.2.5. Opasnosti od kojih se treba zaštititi	19
2.3.3. Ručno-elektrolučno mokro zavarivanje	19
2.4. Fizikalne osnove podvodnog zavarivanja	21
2.5. Vodikove pukotine i mehanizmi nastanka	27
2.6. Pregled metoda određivanja vodika u zavarenim spojevima	28
2.7. Čelici povišene čvrstoće općenito	29
2.7.1. Način proizvodnje čelika povišene čvrstoće	30

2.7.2. Proces kontroliranog termomehaničkog valjanja čelika u obliku trake	30
2.7.2.1. Predgrijavanje	30
2.7.2.2. Grubo termomehaničko valjanje	31
2.7.2.3. Završno termomehaničko valjanje	31
2.7.2.4. Snažna redukcija debljine lima	31
2.7.2.5. Režim hlađenja	31
2.7.2.6. Temperatura namatanja	31
2.7.3. Oblikovanje cijevi i postupak zavarivanja	32
2.7.4. Osobine i svojstva čelika za cijevi	33
2.8. Zavarljivost čelika povišene čvrstoće	38
2.8.1. Hladne pukotine	40
2.8.1.1. Utjecaj strukture na nastanak hladnih pukotina	41
2.8.1.2. Utjecaj difuzijskog vodika	42
2.8.2.3. Utjecaj naprezanja	43
2.8.3. Metode ispitivanja sklonosti hladnim pukotinama i postojeći modeli	44
2.8.4. Ispitivanje pukotina prema Tekken metodi	46
<b>3. EKSPERIMENTALNI DIO</b>	<b>49</b>
3.1. Opis eksperimenta	49
3.2. Izvor struje za zavarivanje	50
3.3. Dodatni materijal	50
3.4. Osnovni materijal	51
3.5. Parametri zavarivanja	52
<b>4. ANALIZA REZULTATA TEKKEN METODE</b>	<b>58</b>
4.1. Vizualni pregled zavarenih uzoraka	58
4.2. Analiza makroizbrusaka	59
4.2.1. Uzorak 11	59
4.2.2. Uzorak 12	60
4.2.3. Uzorak 21	61
4.2.4. Uzorak 22	62
4.2.5. Uzorak 32	63
4.2.6. Uzorak 33	64
4.2.7. Usporedba koeficijenata pukotine	65

4.3. Mjerenje tvrdoće (HV10) na uzorcima	66
4.3.1. Tvrdoća materijala	67
4.3.2. Provođenje ispitivanja tvrdoće	68
<b>5. ZAKLJUČAK</b>	<b>72</b>
<b>6. LITERATURA</b>	<b>74</b>

**SAŽETAK RADA**

U ovom radu obrađena je problematika podvodnog mokrog zavarivanja čelika za cjevovode API 5L X70 Tekken metodom s aspekta osjetljivosti na nastanak hladnih pukotina. U uvodnom dijelu obrazložena je motivacija istraživanja te je dan presjek dosadašnjih spoznaja i provedenih istraživanja na području mokrog podvodnog zavarivanja, mehanizama nastanka hladnih pukotina i razvoja čelika za cjevovode. Definirane su hipoteze te je osmišljen plan eksperimenta za dobivanje relevantnih informacija nakon će biti moguće donijeti određene zaključke te odbaciti ili prihvatiti hipoteze.

Eksperimentalni rad proveden je u Laboratoriju za zavarivanje, Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Iz osnovnog materijala API 5L X70 izrađene su ploče za određivanje Tekken metodom. Primijenjen je postupak REL zavarivanja, na tri razine unosa topline. Nakon zavarivanja izveden je vizualni pregled kao i ispitivanje penetrantima, te su izmjerene tvrdoće HV10.

Analiza rezultata je pokazala da postupak zavarivanja, ovisno o unosu topline imaju utjecaja na difundirani vodik i na vrstu pojavljivanja pukotine, bilo u ZUT-u ili MZ. Također je pokazano da se unosom topline može utjecati na mikrostrukturu u ZUT-u što se direktno očitava na vrijednostima tvrdoća i smanjenju rizika od pojave hladnih pukotina.

Na osnovi provedenog ekperimentalnog rada i analize podataka dobivenih izvedenih Tekken metodom zaključeno je da je moguće podvodno mokro zavarivanje na čeliku X70 uz primjenu adekvatnog unosa topline i dodatnog materijala.

## **II**

### **IZJAVA**

Izjavljujem pod punom odgovornošću da sam diplomski rad izradio samostalno, koristeći znanja sakupljena tijekom studija, te saznanja iz raspoložive literature.



### III

#### POPIS OZNAKA

Latinske oznake

Oznaka	Opis	Jedinica
H <sub>D</sub>	količina difundiranog vodika izražena preko količine nataljenog materijala zavara	ml H <sub>2</sub> /100g
H <sub>F</sub>	količina difundiranog vodika izražena preko protaljene površine zavara	ppm
H <sub>FR</sub>	količina difundiranog vodika određena francuskom metodom	ppm
H <sub>JIS</sub>	količina difundiranog vodika određena japanskom metodom	ml H <sub>2</sub> /100g
A <sub>D</sub>	površina nataljenog materijala zavara	mm <sup>2</sup>
A <sub>F</sub>	površina protaljenog materijala zavara	mm <sup>2</sup>
C <sub>0</sub>	koncentracija vodika u metalu	ppm
D <sub>H</sub>	koeficijent difuzije vodika	m <sup>2</sup> /s
R <sub>IK</sub>	kritično Implant naprezanje	N/mm <sup>2</sup>
R <sub>e</sub>	granica razvlačenja	N/mm <sup>2</sup>
R <sub>m</sub>	vlačna čvrstoća	N/mm <sup>2</sup>
K <sub>V</sub>	udarna radnja loma	J
A	istezljivost	%
Z	kontrakcija	%
CE	ekvivalent ugljika prema IIW	%
P <sub>cm</sub>	ekvivalent ugljika prema Itto-Bessyou	%
V <sub>ntp</sub>	volumen vodika preračunat na 0°C i 1.013 bar	ml
V	očitan volumen vodika na mjernoj cjevčici	ml
B	tlak okoline	bar
T <sub>ok</sub>	temperatura okoline	K
T <sub>c</sub>	kritična temperatura	°C
T	temperatura	°C
E	unos topline	kJ/mm
I	jakost struje zavarivanja	A
U	napon zavarivanja	V
v <sub>Z</sub>	brzina zavarivanja	cm/min
t <sub>8/5</sub>	vrijeme hlađenja od 800 do 500°C	s
b	širina zavara	mm
p	penetracija	mm

$h$	nadvišenje zavora	mm
$m$	masa navara	g
$T_e$	završna temperatura valjanja	°C
$M_s$	temperatura početka stvaranja martenzita	°C
$H_{max}$	visina odvajanja mjehurića	mm
$R_o$	promjer inicijalne praznine	mm
$R_{C,max}$	maksimalni promjer zaštitnog mjehura na površini ploče	mm

#### Grčki simboli

Oznaka	Opis	Jedinica
$\sigma_{ad}$	dodatno naprezanje uzrokovano vodikom	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{HIC}$	granična vrijednost naprezanja za hladne pukotine	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon$	greška	
$\mu$	stupanj iskorištenja postupka zavarivanja	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_0$	radna i zaostala naprezanja pri teoriji dekohezije	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_0$	kohezivne sile	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_H$	djelovanje radnih i zaostalih naprezanja zajedno s naprezanjima induciranim vodikom	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_H$	redukcija kohezivnih sila zbog apsorbiranog ili zarobljenog vodika	N/mm <sup>2</sup>

#### Popis kratica

REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
FCAW	Zavarivanje praškom punjenom žicom u plinskoj zaštiti
INNER	Zavarivanje samozaštićujućom praškom punjenom žicom
ASTM	American Society for Testing and Materials
JIS	Japanese Industrial Standards
API	American Petroleum Institute
HIC	Hydrogen induced cracking
SCC	Stress corrosion cracking
MZ	Metal zavora
ZUT	Zona utjecaja topline

## IV

### POPIS SLIKA

Slika 1.1 Polaganje cjevovoda između Aukre i Easingtona (Norveška - Ujedinjeno kraljevstvo)

Slika 1.2 Fiksna platforma

Slika 1.3 Platforma za traženje i bušenje

Slika 1.4 Havarija broda

Slika 1.5 Havarija platforme

Slika 2.2.1 Sustav za pozicioniranje cijevnog priključka s glavom za zavarivanje koja je opremljena kamerom, pištoljem za zavarivanje i indukcijskim zavojnicama za predgrijavanje

Slika 2.2.2 Podvodno mokro zavarivanje

Slika 2.2.3 B-klasa zavora prema AWS D3.6

Slika 2.2.4 Elektrode s dvostrukom nepropusnom oblogom razvijene na FSB-u

Slika 2.2.5 Kontrolni sustav za podvodno

Slika 2.2.6 Podvodni zavar, "točkasto" zavarivanje

Slika 2.2.7 Podvodno zavarivanje trenjem Slika 2.2.8 Atmosfersko ronilačko odijelo

Slika 2.2.9 Sustav za mehaničko spajanje cjevovoda

a) Mehanička obrada i priprema cjevovoda

b) Kompletan sistem u relnim uvjetima, dubina vode 100 m

Slika 2.2.10 Priprema ronilice za uron

Slika 2.2.11 Praćenje ronilice tijekom ispitivanja

Slika 2.3.1 Podmorsko zvono za dva čovjeka

Slika 2.3.2 Podvodni habitat; sustav za popravak cjevovoda uključuje takozvane habitat module koji omogućuju ronionicima rad u suhom okruženju na dnu mora

Slike 2.3.3 Podvodno zavarivanje pri atmosferskom tlaku

Slika 2.3.4 Mokro podvodno zavarivanje

Slika 2.3.5 Ronilac spreman za ronjenje

Slike 2.3.6 Oprema na brodu za podvodno zavarivanje

Slike 2.3.7 priprema oblika zakrpe na površini i pripasavanje na oplatu broda

Slika 2.3.8. Ronioc na platformi

Slika 2.3.9 Čišćenje brusilicom

Slike 2.3.10 Nadglavno i vertikalno zavarivanje

Slika 2.3.11 REL mokro podvodno zavarivanje

Slika 2.4.1 Dijagram ovisnosti  $t_{8/5}$  o unosu topline za zavarivanje u normalnim uvjetima i pri mokrom podvodnom zavarivanju obloženom elektrodom; osnovni materijal St 37-2, debljina 20mm;

Slika 2.4.2 Rastvorljivost vodika u željezu ovisno o tlaku i temperaturi

Slika 2.4.3 Utjecaj unosa topline na količinu difundiranog vodika pri mokrom podvodnom zavarivanju čelika St 37-2

Slika 2.7.1 TTT dijagram čelika X100

Slika 2.7.2 Cijevi raznih promjera i tipova (X70, X90, X100)

Slika 2.7.3 Grafički prikaz kronološkog razvoja čelika za cijevi

Slika 2.7.4 Mehanizmi očvršćavanja za čelike X60, X70 i X80

Slika 2.7.5 Mikrostrukture čelika X60, X70 i X80; usporedba veličine zrna

Slika 2.7.6 TTT dijagram čelika X70 za različite krivulje hlađenja

Slika 2.7.7 Metode legiranja za povećanje čvrstoće metala zavara

Slika 2.8.1 Klasifikacija, lokacija i orijentacija hladnih pukotina sukladno IIW-u

Slika 2.8.2 Utjecajni čimbenici nastanka hladnih pukotina

Slika 2.8.3 Mikrostruktura nastala nakon zavarivanja

Slika 2.8.4 Rastvorljivost vodika u čeliku

Slika 2.8.5 Priprema spojeva za Tekken metodu

Slika 2.8.6 Pukotina uzrokovana vodikom

Slika 2.8.7 Tipovi pukotina

Slika 2.8.8 Omjer pukotine i zavara

Slika 3.1 Priprema umjetne morske vode

Slika 3.2 Uređaj za REL zavarivanje

Slike 3.5.1 Mjerenje parametara zavarivanja

Slika 3.5.2 Rezanje ploča zračnom plazmom na grube mjere

Slike 3.5.3 Nacrt za obradu ploča glodanjem i prikaz pripreme uzorka nakon strojne obrade

Slika 3.5.4 Zavarivanje pomoćnih zavara MAG postupkom

Slika 3.5.5 Uzorak pripremljen za zavarivanje ispitnog zavara

Slika 3.5.6 Pozicioniranje pištolja na početak ispitnog Y-spoja

Slika 3.5.7 Podvodno REL zavarivanje ispitnog Y-spoja

Slike 3.5.8 Čišćenje ispitnog zavara žičanom četkom i čekićem

Slika 3.5.9 Izgled zavarenog uzorka 1 za Tekken-test s unosom topline 12 kJ/cm

Slika 3.5.10 Izgled zavarenog uzorka 2 za Tekken-test s unosom topline 15 kJ/cm

Slika 3.5.11 Izgled zavarenog uzorka 3 za Tekken-test s unosom topline 18 kJ/cm

Slike 3.5.12 Faze ispitivanja penetrantima:

a) nanošenje odmašćivča b) nanošenje penetranta

c) brisanje penetranta te nanošenje razvijaa

Slika 3.5.13 Plinsko rezanje na trake

Slika 3.5.14 Numeriranje i zacrtavanje iglom

Slike 3.5.15 Uzorci pripremljeni za hladno rezanje uz pomoć pile

Slike 3.5.16 Nagrizanje brušenih uzoraka u otopini dušične kiseline

Slika 4.1.1 Ispitivanje penetrantima uzorka 1 s unosom topline 12 kJ/cm

Slika 4.1.2 Ispitivanje penetrantima uzorka 2 s unosom topline 15 kJ/cm

Slika 4.1.3 Ispitivanje penetrantima uzorka 3 s unosom topline 18 kJ/cm

Slika 4.2.1 Lice zavara uzorka 11 sa unosom topline 12 kJ/cm

Slika 4.2.2 Makroizbrusak uzorka 11 sa unosom topline 12 kJ/cm

Slika 4.2.3 Lice zavara uzorka 12 sa unosom topline 12 kJ/cm

Slika 4.2.4 Makroizbrusak uzorka 12 sa unosom topline 12 kJ/cm

Slika 4.2.5 Lice zavara uzorka 21 sa unosom topline 15 kJ/cm

Slika 4.2.6 Makroizbrusak uzorka 21 sa unosom topline 15 kJ/cm

Slika 4.2.7 Lice zavara uzorka 22 sa unosom topline 15 kJ/cm

Slika 4.2.8 Makroizbrusak uzorka 22 sa unosom topline 15 kJ/cm

Slika 4.2.9 Lice zavara uzorka 32 sa unosom topline 18 kJ/cm

Slika 4.2.10 Makroizbrusak uzorka 32 sa unosom topline 18 kJ/cm

Slika 4.2.11 Lice zavara uzorka 33 sa unosom topline 18 kJ/cm

Slika 4.2.12 Makroizbrusak uzorka 33 sa unosom topline 18 kJ/cm

Slika 4.2.13 Usporedba koeficijenata pukotina

Slika 4.3.1 Tvrdomjer Reicherter TM12

Slika 4.3.2 Raspored mjernih mjesta za određivanje tvrdoće

Slika 4.3.3 Grafički prikaz tvrdoća kod uzorka 11

Slika 4.3.4. Grafički prikaz tvrdoća kod uzorka 22

Slika 4.3.5 Grafički prikaz tvrdoća kod uzorka 33

Slika 4.3.6 Grafički prikaz usporedbe tvrdoća kod uzorka 11, 22 i 33

**POPIS TABLICA**

Tablica 2.1. Metode ispitivanja sklonosti hladnim pukotinama i postojeći modeli

Tablica 3.1. Kemijski sastav metala zavara elektrode Lastek 1008 (suho zavarivanje)

Tablica 3.2. Mehanička svojstva metala zavara elektrode Lastek 1008

Tablica 3.3. Kemijski sastav čelika API 5L X70

Tablica 3.4. Zahtjevi za mehanička svojstva za čelik X70 prema normi API 5L

Tablica 3.5. Parametri zavarivanja

Tablica 4.1. Rezultati ispitivanja penetrantima

## 1. UVOD

Potruga za "off-shore" ugljikovodicima dovela je cjelokupnu naftnu industriju do sve većih dubina gdje su zahtjevniji eksploatacijski uvjeti. Potrebna su velika nastojanja u istraživanju da bi se zahtjevi eksploatacije zadovoljili. Cjevovodi su najučinkovitije, najjeftinije i najsigurnije sredstvo transporta nafte i plina od nalazišta do potrošača i predstavljaju okosnicu opskrbe energijom pri čemu svakodnevno svjedočimo instalaciji novih podvodnih postrojenja i to ne samo na globalnom nivou, već i u Jadranskom moru. Podatak da je npr. samo u SAD-u u funkciji više od 48000 km podvodnih cjevovoda govori o jednom kompleksnom podvodnom sustavu, dio kojeg je već i više desetaka godina u radu te traži primjenu adekvatnih tehnologija za održavanje kako bi se osigurala cjelovitost sustava. Poznato je da havarija cjevovoda može dovesti do ljudskih žrtava i do teških posljedica za okoliš te je, da bi se spriječili takvi scenariji, nužno poznavati i definirati sve čimbenike koji utječu na integritet cjevovoda. Kada se govori o podvodnim strukturama, jedna od nezaobilaznih tehnologija je mokro podvodno zavarivanje o kojem se još uvijek govori kao o tehnologiji drugog reda.

Velika količina difundiranog vodika i brzo hlađenje činjenice su koje se ne mogu izbjeći, ali na koje se svakako može utjecati i to prvenstveno odabirom postupka zavarivanja, dodatnog materijala i adekvatnih parametara. Uz pojam mokro podvodno zavarivanje još uvijek se veže isključivo REL zavarivanje što je u većini slučajeva i istina. Međutim, sve više se eksperimentira s praškom punjenom žicom koja nudi niz prednosti. Nedostatak je svakako komplicirana i složena oprema, ali je velika prednost mogućnost automatizacije iz čega slijedi i primjena na većim dubinama. I dok se uz REL postupak mora voditi računa o ronioncu-zavarivaču, podvodno zavarivanje praškom punjenom žicom moguće je provesti i bez ronionca-zavarivača. Jasno je da to traži izradu kompleksnih automata za zavarivanje ali postoji puno manji rizik i nema vremenskih ograničenja za radove na većim dubinama.

Cjevovodi i "off-shore" postrojenja, odnosno materijali koji se primjenjuju u izradi i održavanju postrojenja uglavnom imaju vrlo zahtjevnu okolinu stoga se koriste čelici povišene čvrstoće.



**Slika 1.1 Polaganje cjevovoda između Aukre i Easingtona (Norveška - Ujedinjeno kraljevstvo) [2]**

Čelici povišene čvrstoće (vlačne čvrstoće od 500MPa do 700MPa) sve češće se koriste u "off-shore" konstrukcijama uključujući i proizvodne platforme sa velikim zahtjevima u eksploataciji. Takvi čelici nude veliki broj prednosti u usporedbi sa standardnim čelicima, a naročito kad je težina konstrukcije bitan faktor.

Ovaj rad obuhvaća vrstu čelika korištenih u "off-shore" konstrukcijama, cjevovodima; njihova mehanička svojstva, svojstva zavarljivosti i prikladnost za sigurnu primjenu u smislu pukotina, nepravilnosti i prikaz prisutnosti vodika [8].

Razvoj čelika za cjevovode podrazumijeva primjenu mikrolegiranih čelika visoke čvrstoće pri čemu su za postizanje dobrih mehaničkih svojstava primijenjeni kontrolirani uvjeti valjanja i hlađenja. Čelik gradacije X70 prema API 5L spada u skupinu čelika visoke čvrstoće i danas je standard u izgradnji kopnenih i podmorskih cjevovoda i smatra se dobro zavarljivim u normalnim uvjetima. U literaturi nema podataka koji bi analizirali zavarljivost ovog čelika pri uvjetima mokrog podvodnog zavarivanja posebno kada se govori o sklonosti hladnim pukotinama. Ovaj rad djelomično istražuje navedenu problematiku sa svrhom da se dobiveni rezultati mogu primijeniti u daljnjim istraživanjima po pitanju zavarivanja podvodnih cjevovoda od čelika visoke čvrstoće.

Podvodno zavarivanje je vrlo zahtjevna zavarivačka kategorija s obzirom na potrebno znanje i iskustvo da bi se izvršila uspješno na razini zadanih standarda. Ponajveće zasluge u razvoju podvodnog zavarivanja odnosi se na svjetsku naftnu industriju, dakako "off-shore" postrojenja. S obzirom na zahtjeve tržišta, u cilju pomicanja dubinske granice "off-shore" konstrukcija, kao i neizbježna reparacija potonulih brodova ili na rubu potonuća, zatim postojećih starijih postrojenja, podvodno zavarivanje kao i pridružene aktivnosti, vrlo su potrebne djelatnosti i posvećuje im se veliko zanimanje. Za podmorski transport (cjevovodi) također ima interesa da se povodno zavarivanje razvija jer vlasnici tih objekata rade na tome da smanje troškove na minimum, a pri tom da zadovolje sve tehničke, ekološke kao ekonomske standarde.



**Slika 1.2 Fiksna platforma [52]****Slika 1.3 Platforma za traženje i bušenje [54]****Slika 1.4 Havarija broda [52]****Slika 1.5 Havarija platforme [53]**

Okolina u kojoj se podvodno zavarivanje odvija uvelike utječe na zahtjeve i uspjeh operacija zavarivanja, te se stoga uzimaju u obzir svi uvjeti koji povećavaju rizik ronjenja i nepovoljno utječu na cijeli sustav i proces zavarivanja. Takvo poštivanje procedure izvođenja radova, adekvatna oprema, kvalitetno stručno osoblje mogu smanjiti, odnosno čak i eliminirati u potpunosti utjecaj otežavajućih okolnosti [3,42].

Problemi kao što su osjetljivost po pitanju vodikovih pukotina zahtjevan je sustav za svakog inženjera. Zato znanstvena istraživanja, radovi i literatura ohrabruju širu upotrebu čelika povišene čvrstoće, ali svakako su potrebna daljnja istraživanja na ovom području.

## 2. PREGLED I ANALIZA DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA I SPOZNAJA

### 2.1. Stanje i trendovi u razvoju podvodnog zavarivanja

Održavanje podvodnih konstrukcija zahtjeva primjenu odgovarajućih tehnologija, kao što je npr. podvodno zavarivanje. Dobro uvježban i educiran tim (eng. team) ljudskih resursa, uključujući ronioce i organizacijski tim na površini odlučujući su u ostvarivanju visoke sigurnosti na radu, te su nosioci velike odgovornosti u obavljanju ovakvih poslova. U zadnjih desetak godina pojačala su se istraživanja za poboljšavanje primjene podvodnog zavarivanja. U Hrvatskoj je to područje od velike važnosti, zbog velike količine naftnog i plinskog transporta koji se odvija u Jadranskom moru. Katedra za zavarene konstrukcije, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, sveučilišta u Zagrebu provodi nekoliko projekata na području podvodnih aktivnosti. [43]

Potraga za "off-shore" ugljikovodicima dovela je naftnu industriju do sve većih dubina. U zadnjih par desetljeća aktivnosti na ovom području prerasle su granice kontinentalnog pojasa u Meksičkom zaljevu, Brazili, Zapadnoj Africi, sjeverno- zapadnoj Europi i Mediteranskom području. Nafta se danas proizvodi na dubinama od 1000 m, sa tendencijom razvoja na dvostruko dublja područja. [43]

Dokaz kvalitete je uvođenje podvodnog mokrog zavarivanja kao službene tehnologije održavanja plovila u britanskoj mornarici. Podaci navedeni u [28] pokazuju da su uštede primjenom podvodnih tehnologija u odnosu na klasične popravke na suhom doku u prosjeku oko 74%. Kada se govori o podvodnom zavarivanju cjevovoda vidljiv je porast intenziteta istraživanja u nekoliko zadnjih godina iako postoje i podaci o primjeni na realnim objektima poput popravka cjevovoda na LNG terminalu Mossey Bay u Južnoafričkoj Republici na dubini od 20m. [29]

Važnost tehnologija podvodnog zavarivanja i ispitivanja ističu se kroz brojna postrojenja, popravke i održavanja pomorskih objekata. Štoviše, kako se eksploatacija nafte i plina sve više "pomiče" na veće dubine, tako i tehnički nivo ovih tehnologija zahtjeva daljnja ulaganja i razvoj. Iako je automatizacija neizbježna, u nekim situacijama, nezamjenjive su konvencionalne metode ronjenja, pa je stoga od velike važnosti edukacija i uvježbavanje ljudskih resursa, također je očito da je postignuti nivo razvoja ovih tehnologija primjenjiv u raznim situacijama. Poznato je da su u zadnjih tridesetak godina mnogi projekti pokrenuti s ciljem razvoja podvodnih tehnologija na razini "fit-for-service". Neki od ovih projekata dali su dobre rezultate ali mnogi su se ugasili usljed velikih troškova i male fleksibilnosti. Dugo vremena su podvodne tehnike zavarivanja bile sinonim za loše zavarivanje koje se karakteriziralo veliko poroznosti, pukotinama, te slabom žilavosti i sklonosti pucanju. Nedostatak iskustva i znanja bio je prisutan kod tvrtki koje su izvodile

neadekvatne zavrivačke procedure, koje nisu imale dobru uvježbanost zavarivača, ni adekvatne elektrode. S vremenom se taj status uvelike promjenio, a promjenio se i pristup projektima za podvodno zavarivanje s naglaskom na visok stupanj osiguranja kvalitete. [43]

Procedure i kvalifikacije za podvodno zavarivanje upotpunjene su u "AWS D3.6 Specifikaciji za podvodno mokro zavarivanje", koja uzima u obzir faktore podvodnog okruženja. "AWS D3.6 Specifikaciji za podvodno mokro zavarivanje", prvi put je objavljena 1983.godine s ciljem utvrđivanja trenutnog stanja razvoja tehnologija povezanih s podvodnim zavarivanjem i osiguravanjem potrebnih zahtjeva koji se moraju ispuniti za podvodno zavarivanje. Specifikacija se svakih 5 godina grubo revizira kako bi se aktualizirala s modernim tehnologijama. AWS D3.6 daje četiri klase zavara koje se označuju s A, B, C i O. Klase su definirane na sljedeći način: klasa A zavara, uspređuju se sa zavarama izvan vode po vrijednostima određenih komparativnih svojstava i zahtjeva za testiranje. Klasa B zavara, za manje kritične primjere, kod kojih se mogu tolerirati niska duktilnost, veliki porozitet i visok stupanj diskontinuiteta. Klasa C zavara, koji se primjenjuju tamo gdje stupanj opterećenja nije primaran. Klasa O zavara, koji moraju zadovoljavati zahtjeve neke druge norme ili specifikacije. Za svaku od navedenih klasa zavara, AWS D3.6 također daje detalje o kriterijima nerazornih i razornih ispitivanja. Kako bi se zadovoljio kriterij osiguranja kvalitete, razvijene su brojne tehnike podvodnog ispitivanja. [43]

Mnoge od tih tehnika su se s vremenom izgubile, ali neke su se dalje razvijale i danas su primjenjive kod ROV (Remote Operated Vehicle) i AUV (Autonomous Underwater Vehicle). Kao što je već ranije napomenuto, konvencionalno ronjenje također je dalo veliki doprinos razvoju na tom području, pogotvo područje razvoja opreme i mješavina plinova. Nova ronilačka odjela omogućuje roniocu rad na većim dubinama s povećanom sigurnosti i radnom sposobnosti. [43]

S obzirom na trenutni trend razvoja, Ministarstvo obrazovanja, znanosti i sporta RH podupire projekt podvodnog zavarivanja i ispitivanja koji se provodi na FSB-U, Sveučilišta u Zagrebu. Razvoj podvodnog zavarivanja i ispitivanja važno je za objekte i postrojenja koji su prisutni u Jadranskom moru. Hrvatska industrija zajedno s nekoliko međunarodnih institucija uključena je u projekt, i današnji rezultati projekta vidljivi su u okviru praktične primjene tehnike podvodnog zavarivanja i ispitivanja.

## 2.2. Razvoj podvodnog mokrog zavarivanja

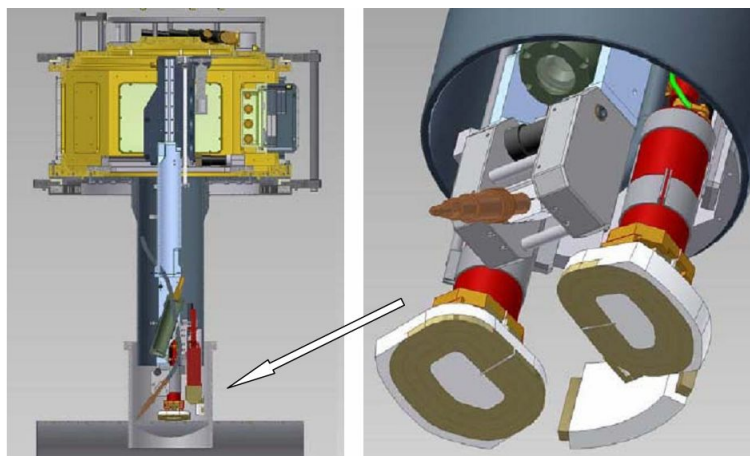
Podvodno zavarivanje može se podijeliti na tri osnovna tipa, kao što slijedi: [43]

1. Kod mokrog podvodnog zavarivanja najčešći je postupak ručno zavarivanje. MIG-MAG postupak zavarivanja punjenom žicom najviše se izvodio u državama bivše SSSR. Zavarivanje trenjem ima prednost jer je neosjetljivo kod primjene u većim dubinama na sredstvima ROV-a. Zavarivanje trenjem godinama se podvodno uspješno primjenjivalo kao sredstvo pričvršćivanja anoda za "off-shore" konstrukcije i brodove.
2. Zavarivanje u vodonepropusnim komorama, izvodi se na suhom. Čvrsta čelična nepropusna komora za zavarivače montirana je na strani konstrukcije koju se treba zavarivati otvorena je prema atmosferi.
3. Zavarivanje pod tlakom, oko konstrukcije koja se treba zavarivati montira se komora koja se ispunjava plinom pod odgovarajućim tlakom.

REL, TIG i MIG-MAG postupci najčešće se koriste za postizanje visokointegriranih zavara, za primjenu pri velikim dubinama i kod cjevovoda. Veliki broj istraživanja je posvećen objašnjavanju utjecaja visokog tlaka na ponašanje električnog luka te optimalnom podešavanju parametara zavarivanja. [43]

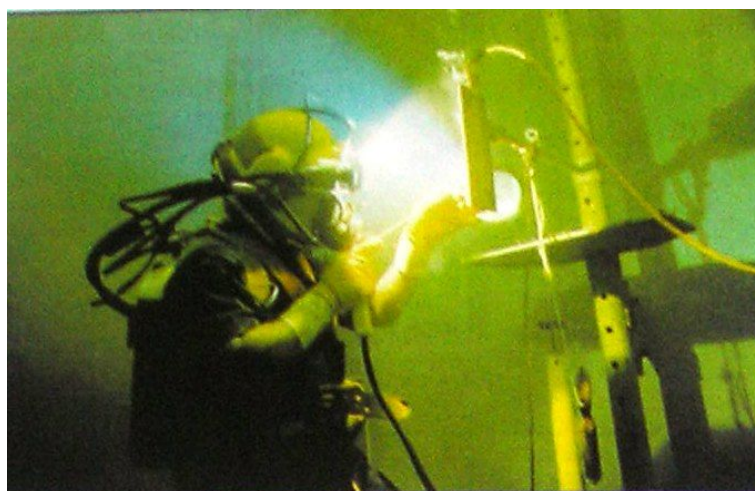
Trend istraživanja ide u pravcu razvoja dodatnih materijala, zaštitnog plina i optimalizacije parametara zavarivanja. Koriste se digitalni impulsni uređaji što samo potvrđuje da je jedna od alternativa razvoja podvodnog zavarivanja razvoj sofisticiranih i posebno prilagođenih izvora struje, iako se to često zanemaruje. Ispitivanja su provedena na čelicima X65 i X70 sa i bez predgrijavanja. Dodatni materijal je metalnim prahom punjena žica. Interesantno je spomenuti činjenicu da se pri ispitnim tlakovima od 18 bar, što odgovara dubini od 180m, vremena  $t_{8/5}$  iznose oko 2 do 3 s, ovisno o predgrijavanju. Za temperaturu radnog komada od 14°C, prosječno vrijeme hlađenja  $t_{8/5}$  iznosi 2,1 s što je usporedivo s brzinom hlađenja pri mokrom podvodnom zavarivanju za približno isti unos topline. Međutim, količina vodika iznosi od 5 do 10 ml  $H_2/100g$  zavara što je u odnosu na mokro podvodno zavarivanje znatno manje. To su potvrdila i ispitivanja na hladne pukotine Tekken testom koja su pokazala da se predgrijavanjem od 50°C u potpunosti eliminira pojava hladnih pukotina u korijenskom zavaru. Ovo opsežno istraživanje potvrdilo je mogućnost primjene MAG postupka u hiperbaričnim uvjetima do čak 2500m dubine, međutim primjena opreme za automatsko zavarivanje zahtjeva enormna financijska ulaganja kao i sofisticiranu opremu.[31,32] Jedno od tehničkih rješenja za izvedbu automatiziranog zavarivanja cjevnog

priključka prikazano je na slici 2.2.1 Posebno je zanimljiv induktivni sustav za predgrijavanje koji je integriran u opremu što govori o važnosti predgrijavanja i u hiperbaričnim uvjetima. [16]



**Slika 2.2.1 Sustav za pozicioniranje cijevnog priključka s glavom za zavarivanje koja je opremljena kamerom, pištoljem za zavarivanje i indukcijskim zavojnicama za predgrijavanje [32]**

Slična istraživanja samozaštićujućom praškom punjenom žicom na čeliku X60 opisana su u [33], samo što je korištena puno jednostavnija oprema i uređaji uz poluautomatsko zavarivanje. Za dobavu žice primijenjen je «push-pull» sustav. Ovisno o promjeru žice i parametrima, postignut je depozit od 2 do 6 kg/h nataljenog materijala što potvrđuje veću produktivnost FCAW procesa u odnosu na REL. U radovima [25,26,27] dani su primjeri istraživanja primjene podvodnog zavarivanja, suhog i mokrog, za reparaturu na cjevovodima od čelika X65 i X70. U [30] se navodi da nema puno praktičnih iskustava s područja reparaturnog zavarivanja visokočvrstih čelika te da je potrebno i nužno, baš zbog sve većih zahtjeva i potražnje, provesti obimna ispitivanja kako bi se riješilo pitanje tehnologije. Zanimljivo je da se isto spominju uspješni popravci na čeliku X70 primjenom mokrog podvodnog zavarivanja ali bez ikakvih detaljnih podataka. [16]



**Slika 2.2.2 Podvodno mokro zavarivanje [43]**

Daljnji razvoj podvodnih aktivnosti uključuje podvodno zavarivanje laserom i tzv. "zavarivanje s vodenom zavjesom", mehanizirani proces kod kojeg stožasti mlaz vode služi kao "zavijesa" za zaštitu plina za zavarivanje. Taj se postupak primjenjivao u Japanu u kasnim 1990-im godinama. Materijali koji se najčešće zavaruju su čelici za cjevovode i "off-shore" konstrukcije. Nekoliko stotina popravaka izvedeni su na platformama ili brodovima a dnevno se mogu pročitati mnogi izvještaji o postupcima podvodnog zavarivanja diljem svijeta. Zavarivanje pod pritiskom je dobro usavršena, istraжена i ispitana tehnologija. Sadašnja istraživanja provode se u svrhu osiguravanja parametara zavarivanja na većim dubinama, od 500 do 1000 m. [43]

Ručno elektrolučno mokro zavarivanje je najfleksibilnija i najekonomičnija tehnologija za popravke i održavanje. Iako dubina i okolina predstavljaju ograničenja, s dobro uvježbanim zavarivačima, moguće je postići odgovarajuću kvalitetu zavarivanja. Zbog dobre primjenjivosti i fleksibilnosti, REL postupak je najčešće korištena tehnika za podvodno mokro zavarivanje. Da bi postigli prihvatljivu kvalitetu podvodnog zavarivanja, potrebno je zadovoljiti tri osnovne komponente u podvodnom mokrom zavarivanju. [43]

*Prvo*, dobro uvježbani i educirani ronioci-zavarivači su temelj aktivnosti podvodnog zavarivanja. EWF vodič Doc 570-01 osigurava program za educiranje zavarivača-ronioca za podvodno mokro zavarivanje. Za vrijeme trening ronioca-zavarivača, posebno se naglašava sama tehnika zavarivanja. Upućuje se na to da nepravilna tehnika zavarivanja povećava udio vodika i porozitet u metalu zavora. Poznat problem u podvodnom zavarivanju je uključenje troske što je posljedica lošeg nagiba elektrode i veće brzine zavarivanja. Veliki utjecaj na sadržaj difuniranog vodika ima sama tehnika zavarivanja. Ronioci- zavarivači moraju imati izvrsne vještine zavarivanja u realnim uvjetima i na različitim praktičnim zadacima kako bi se izbjegle pojave grešaka. Također se velika važnost, uz vještinu zavarivanja, pridaje i vještini ronjenja, a to dvoje je u pravilu jako teško postići. [43]

*Drugo*, za uspostavljanje i održavanje električnog luka potrebne su dobre elektrode. Do sada su razvijene obložene elektrode pokazale dobra operativna svojstva. Bitno je da obloge osiguraju jednostavno otklanjanje troske i što je moguće nižu razinu vodika. Što se tiče operativnih karakteristika, najbolje rezultate dale su rutne elektrode. Također je bitno da vodonepropusna obloga "gori" zajedno sa elektrodom, kako bi se spriječio direktan doticaj elektrode s vodom za vrijeme postupka zavarivanja. Treba naglasiti kako, osim smanjenja iznosa struje, kemijska agresivnost vode može oštetiti kompaktnost obloge, te uzrokovati smanjenje stabilnosti električnog luka ili čak prekid električnog luka. Zbog toga, veliku ulogu u proizvodnji visoko kvalitetnih elektroda za podvodno mokro zavarivanje ima vodonepropusna obloga, koja ima funkciju zaštite



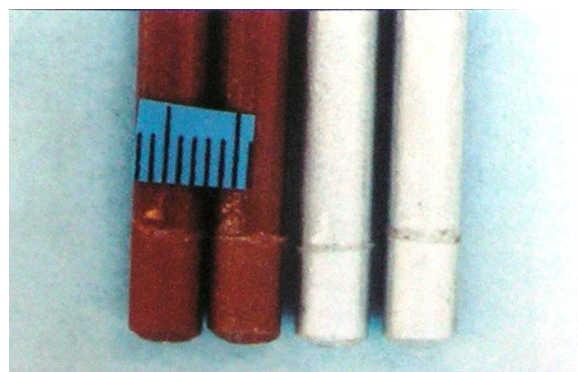
od utjecaja vode kao i štetnih kemijskih sastojaka, te postojanost na visokim temperaturama električnog luka i jezgre elektrode. Postoje mnogobrojne tvrtke i institucije koje se bave razvojem i proizvodnjom elektroda za podvodno mokro zavarivanje. Činjenica je da se ponekad elektrode za primjenu zavarivanja u suhom okruženju premazuju vodonepropusnom oblogom. Dokazano je da takav pristup podvodnom mokrom zavarivanju može prouzrokovati loše operativne karakteristike i slabu kvalitetu zavara. Veliku važnost imaju svojstva elektrode. Svojstva zavarenog spoja mogu se poboljšati modifikacijom obloga elektroda s aditivima, koji povećavaju stabilnost električnog luka ili koji smanjuju udio vodika. Za smanjenje udjela vodika potrebne su posebne metode zavarivanja kako bi se produljilo vrijeme hlađenja i napravila toplinska obrada prethodnih nataljenih metala. Za visokočvrste čelike, ispitivanja su provedena na nehrđajućem čeliku i elektrodama na bazi nikla. Elektrode s dvostrukom oblogom pokazale su dobre rezultate, pogotovo zbog visoke kvalitete prevlaka koje sprečavaju penetraciju vode i degradaciju obloge, te mogućnosti održavanja visoke kvalitete zavara. [43]

*Treće*, adekvatni izvori za zavarivanje moraju osigurati dobre parametre zavarivanja. Ispravljači su konstruirani tako da imaju smanjen napon i primjerena svojstva za zavarivanje.

Također se upotrebljavaju i tranzistorski izvori struje, i daljnja istraživanja upućuju na to da, sadašnji stadij razvoja tehnologije izvora struje omogućuje bolje uspostavljanje električnog luka i njegovu stabilnost. Intenzivno dinamičko ponašanje izvora struje potrebno je za ostvarivanje električnog luka u većim dubinama. Izvor struje za zavarivanje mora biti podešen za postupak podvodnog mokrog zavarivanja, ne samo zbog dobre stabilnosti luka, već izbog sigurnosti ronioca-zavarivača. [43]



**Slika 2.2.3 B-klasa zavara prema AWS D3.6 [43]**



**Slika 2.2.4 Elektrode s dvostrukom nepropusnom oblogom razvijene na FSB-u [43]**

Zbog činjenice da je vrlo teško pronaći visokokvalitetnog ronica- zavarivača te zbog ostalih nedostataka mokrog zavarivanja, pojavila su se alternativna rješenja u obliku podvodnog

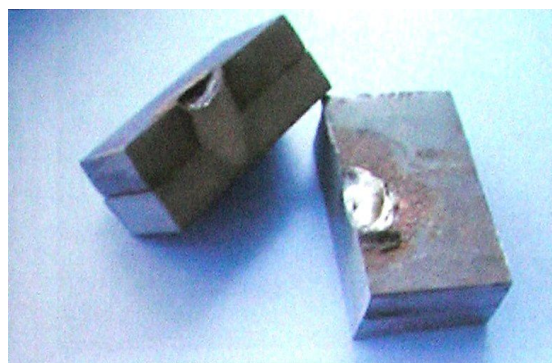
“točkastog zavarivanja”. Novi dodatni materijal i kontrolni uređaj upotpunjavaju tradicionalne zavarivačke vještine potrebne za podvodno mokro zavarivanje. Elektrode protaljuju materijal, kroz kontrolni se uređaj provodi struja potrebna za taljenje elektrode i stvarenje točkastog zvara, nastaje čvrsti zavar, sličan je principu zakovica. [43]

Za ovaj postupak potreban je poseban kontrolni uređaj s odgovarajuće podešenim parametrima. Kod ove operacije zavarivanja, nema potrebe da ronilac- zavarivač kontrolira parametre kao što su brzina zavarivanja, kut nagiba elektrode, duljina električnog luka, itd., tj. sve one parametre koji se moraju kontrolirati u uvjetima konvencionalnih metoda zavarivanja.

Također nije potreban dobar vizualan pregled postupka zavarivanja budući da ronilac- zavarivač ne mora nadgledati luk kao što je to potrebno u konvencionalnim uvjetima. Iako je vizualnost smanjena, kvaliteta zvara je i dalje visoka. Iako je ovaj postupak dobra zamjena za REL postupak zavarivanja, on ima svoja ograničenja i nije u mogućnosti potpuno zamijeniti REL zavarivanja. [43]



**Slika 2.2.5 Kontrolni sustav za podvodno [43]**



**Slika 2.2.6 Podvodni zavar, “točkasto” zavarivanje [43]**

Postupak mokrog REL zavarivanja danas je jako raspostranjen i godinama se koristi kod popravaka off-shore platforme, uključujući i one koje su pretrpjele štete uzrokovane elementarnim nepogodama, kao što su uragani ili štete nastale u ratu. U budućnosti će se tražiti popravljane konstrukcija od čelika s povišenom i visokom čvrstoćom u dubokim vodama. Zbog visokog stupnja difundiranja vodika, postoji opasnost od pojave loma uzrokovanog povećanim udjelom vodika, a ona raste s povećanjem ekvivalenta ugljika. Prema tome javlja se potreba za razvojem obloga elektroda kao i sofisticiranih tehnologija izvora struje. [43] Podvodno zavarivanje praškom punjenim žicama istraživalo se u svrhu popravaka cjevovoda i trupa broda. Izvedba praškom

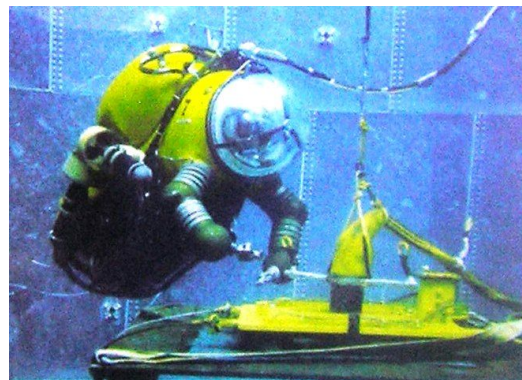


punjenih žica vrlo je bitna kod kvalitete zavarivanja. Ovaj postupak je poluautomatiziran, a ukoliko je primjena prikladna moguće ga je potpuno automatizirati.

Osim postupka podvodnog REL zavarivanja, dobro razvijen postupak je i podvodno zavrivanje trenjem. Do sad je primjena podvodnog zavarivanja trenjem bila ograničena na primjenu u plitkim vodama kao što je anodno pričvršćivanje, vanjski prekidi, itd. Katastrofa podmornice Kursk na 106m dubine, pokazala je značajnu primjenu podvodnog zavarivanja trenjem gdje podvodno REL zavarivanje nije moglo osigurati takvu kvalitetu zava koja se zahtjevala. Neki od programa podvodnog zavarivanja trenjem koriste se u situacijam spašavanja na dubinama od 606m. Razvijena je i posebna oprema, uključujući posebna atmosferska ronilačka odjela koja su robotizirana i omogućuju roniozu bolje radne uvjete i sigurnost. Glavni parametri podvodnog zavarivanja trenjem su rotacija, vrijeme trajanja i tlak. Zavarivanje trenjem spada u postupke zavarivanja tlakom, ne dolazi do taljenja materijala. Linija taljenja i zona utjecaja topline su relativno male u usporedbi s elektrolučnim postupcima zavarivanja. Čvrstoća zava je jednaka ili čak veća od čvrstoće osnovnog materijala, a problemi kao što su uključine i poroznost zava su isključene. Međutim, postupak je osjetljiv na ekvivalent ugljika, povećanje CE rezultira povećanjem tvrdoće. [43]

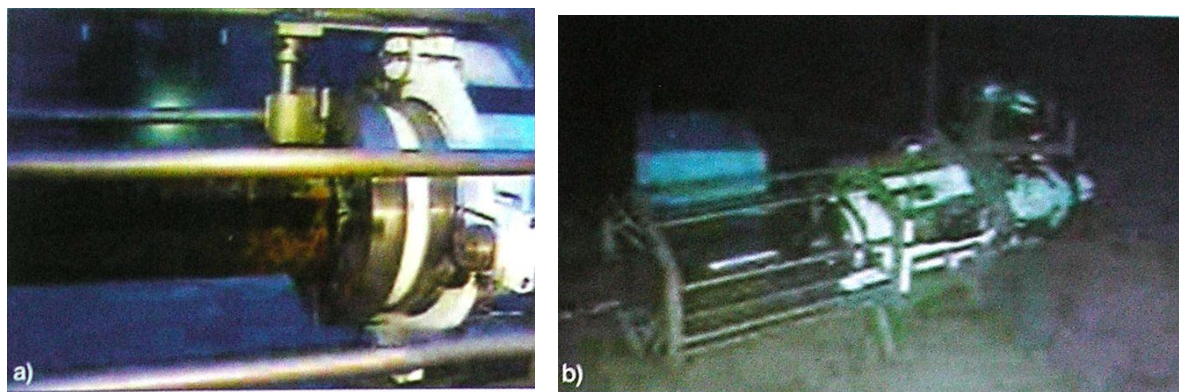


**Slika 2.2.7 Podvodno zavarivanje trenjem [43]**



**Slika 2.2.8 Atmosfersko ronilačko odijelo [43]**

Uz tehnike zavarivanja, primjenjuju se i tehnike mehaničkog spajanja. Sofisticirani podvodni, hidraulički sistemi razvijeni su za mehaničko spajanje cjevovoda, a mogu se primjenjivati za popravak cjevovoda te upravljati s površine. Priprema površine vrlo je bitna kod ovog postupka, cijev se mehanički obrađuje i nakon toga spaja s posebnim obujmicama. [43]



**Slika 2.2.9 Sustav za mehaničko spajanje cjevovoda [43]**

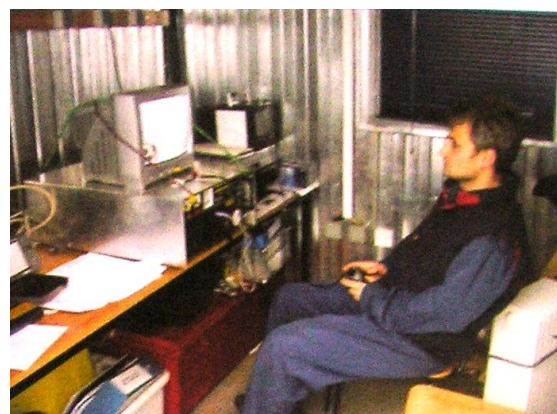
**a) Mehanička obrada i priprema cjevovoda**

**b) Kompletni sistem u relnim uvjetima, dubina vode 100 m**

Primjena ROV u podvodnom zavarivanju istražuje se kroz nekoliko projekata. Kao već ranije napomenutog, Europski projekt ROBHAZ razvio je podvodno robotizirano zavarivanje trenjem. Neki od porjekta kao npr. ARM provedni su u svrhu podvodnog zavarivanja. Za podvodnu elektrólolučno zavarivanje potreban je sofisticirani kontrolni software koji bi osposobio pozicije uređaja i kontrolirao parametre zavarivanja. [43]



**Slika 2.2.10 Priprema ronilice za uron [43]**



**Slika 2.2.11 Praćenje ronilice tijekom ispitivanja [43]**

Kod prve primjene ROV sustava, vizualna inspekcija provedena je jednostavnom nadogradnjom u skladu s tehničkim uvjetima, s nekoliko c/b kamera ili kamerama u boji, kako bi se osigurao najbolji način pregledavanja strukture. Razvijeni su posebni sistemi prikaza slike kako bi omogućili vizualnu inspekciju u uvjetima slabe vidljivosti. [43]

## 2.3. Tehnike podvodnog zavarivanja

Podvodno zavarivanje je svako zavarivanje izvedeno ispod površine vode, a opet podvodno zavarivanje može biti suho i mokro, s obzirom na okolinu koja okružuje mjesto zavarivanja.

### 2.3.1. Suho podvodno zavarivanje

Zavarivački proces kod kojeg su električni luk i zavar odvojeni od neposrednog dodira s okolnom vodom nazivamo suhim podvodnim zavarivanjem.

Postoji nekoliko vrsta suhog podvodnog zavarivanja:

1. podvodno zavarivanje u suhim komorama,
2. podvodno zavarivanje u habitatima,
3. podvodno zavarivanje pri normalnom atmosferskom tlaku.

#### 2.3.1.1. Podvodno zavarivanje u suhim komorama (zvono, mini habitat)

Kod podvodnog zavarivanja u suhim komorama radi se u relativno malim i jednostavnim prostorijama bez dna koje okružuje mjesto zavarivanja. Oblik, konstrukcija i veličina podvodnih komora ovisi prvenstveno o dijelovima koji se zavaruju. U komoru se tlači plin ili plinska mješavina, koja istiskuje vodu i omogućava rad na suhome. Relativnu vlažnost u komori nije moguće kontrolirati, a veličina komore u pravilu dozvoljava predgrijavanje ili toplinsku obradu po izvršenom zavarivanju.



Slika 2.3.1 Podmorsko zvono za dva čovjeka [46]

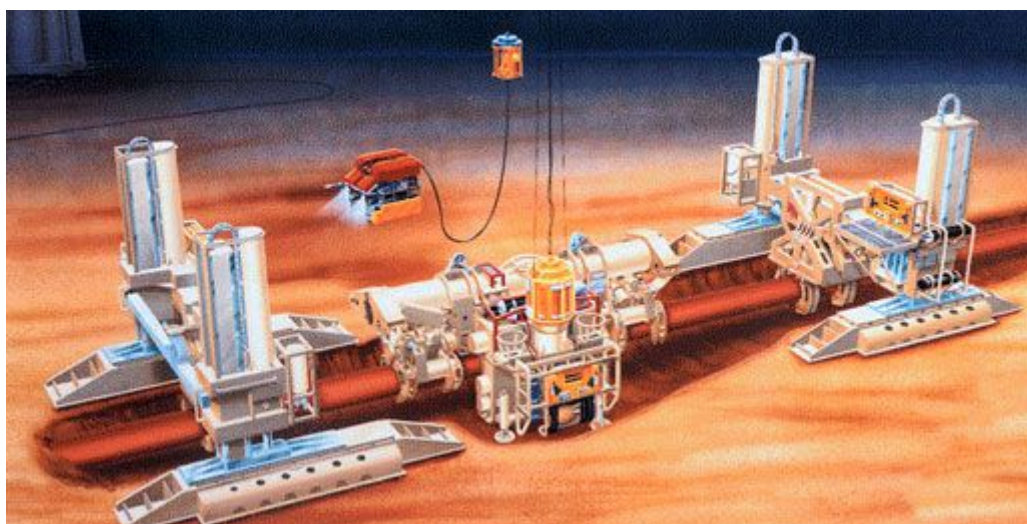


Ovakvo zvono kao na slici 2.3..1. koristi se za transport ronioca sa površine broda do radnog mjesta neki put i na dubinu više od 300 metara. Kad roniodi dosegnu dno izvrši se izjednačavanje tlaka unutar zvona sa tlakom na toj dubini i zatim se otvori izlaz na dnu zvona. Tada jedan od ronioda izlazi na teren i izvršava zadatak dok se drugi nalazi u zvonu nadzirajući njega i sve parametre instrumenata potrebnih za rad pazeći na nešto ne krene na zlo. Zvona posjeduju zapreminu zraka za 24 sata u slučaju zatajenja opreme kao i drugu opremu potrebnu za takve situacije. Opremljeni su vanjskim svjetlima kao i audio-vizualnim sustavom koji je u vezi sa ekipom na površini tako da se sve nadzire dvostruko kako bi roniodi na toj dubini bili fokusirani na posao. Prostor unutar zvona poprilično je malen. Ronioc unutar zvona u mogućnosti je čuti da li partner na radnom mjestu pravilno diše.

Ovaj postupak zavarivanja američka mornarica koristi za trajne popravke na odgovornim podvodnim dijelovima konstrukcija i na čelicima povišene čvrstoće, pri čemu se primjenjuje zavarivanje obloženom elektrodom [1].

#### **2.3.1.2. Podvodno zavarivanje u habitatima (hiperbaričko zavarivanje)**

Zavarivački postupak vrlo je sličan postupku zavarivanja u suhim komorama. Habitatu su čelične konstrukcije u obliku većih prostorija, a njihov oblik i veličina prilagođeni su objektu koji se zavaruje. S pratećeg ronilačkog broda habitat se spušta i postavlja na konstrukciju kada je to moguće ujedno oslanja na morsko dno. Roniodi-zavarivači pri radovima u habitatu u pravilu ne nose ronilačku opremu, a samo za vrijeme zavarivanja koriste zaštitne maske koje štite od zavarivačkih plinova i dimova. Moderni habitatu opremljeni su uređajima za klimatizaciju, sustavom za održavanje života, zatim uređajima za pročišćavanje atmosfere i opremom za kontrolu i nadzor.

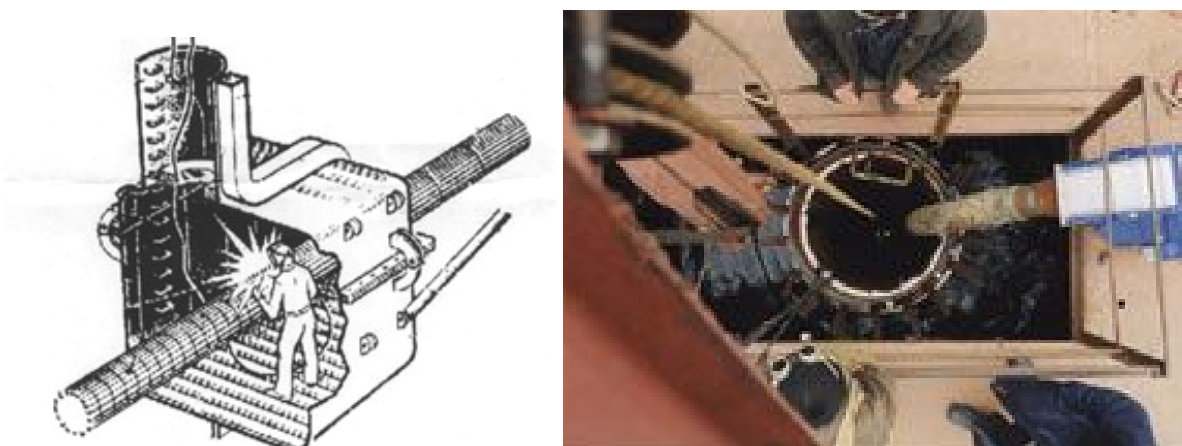


**Slika 2.3.2 Podvodni habitat; sustav za popravak cjevovoda uključuje takozvane habitat module koji omogućuju roniodima rad u suhom okruženju na dnu mora [37]**

Ovakova postrojenja konstruiranja su za radne dubine do 1000m, a uspješno je izveden pothvat zavarivanja na dubini od 2500m. Glavni nedostaci hiperbaričkog zavarivanja jesu: visoki troškovi, ograničenje primjene na spajanje dijelova jednostavnije geometrije radi brtvljenja, visoka složenost operacija i dr.

### 2.3.1.3. Podvodno zavarivanje pri normalnom atmosferskom tlaku

Kada su mjesta za zavarivanje otvoreni prema površini govorimo o podvodnom zavarivanju pri normalnom atmosferskom tlaku od 1bar. Ovaj način zavarivanja nije naišao na neku značajniju primjenu zbog visokih financijskih troškova.



Slike 2.3.3 Podvodno zavarivanje pri atmosferskom tlaku [44]

### 2.3.2. Mokro podvodno zavarivanje

Zavarivački proces kod kojeg su električni luk i zavar nisu odvojeni od neposrednog dodira s okolnom vodom nazivamo mokrim podvodnim zavarivanjem. Dakako da je mokro zavarivanje prvotno, odnosno starije od suhog, a kako nema toliko pomoćnih naprava, odlikuje ga jednostavnost i manja cijena izvođenja procesa, ali naravno ima i nedostataka jer zbog brzog odvođenja topline materijal se zakaljuje, također difuzija vodika u materijal utječu na lošiju kvalitetu zavarenog spoja, odnosno sklonost pojavi pukotina. Najčešća primjena mokrog podvodnog zavarivanja je prilikom reparacija, odnosno sanacijama šteta nastalih prilikom eksploatacije u agresivnoj okolini, dakle korozija off-shore postrojenja ili popravaka cjevovoda kao i brodova, odnosno podmornica. [1]

Podvodno zavarivanje pogodno je za hitne popravke, reparaturno zavarivanje. Ako je i nedostupno remontno brodogradilište, takvo zavarivanje smatra se sekundarnim izborom prilikom

osiguravanja nepropusnosti oplata broda. Primarni izbor za učvršćivanje velikih čeličnih zakrpa bilo bi zakovicama, odnosno vijcima. U hitnom slučaju male zakrpe mogu biti kutno zavarene za vanjsku oplatu. Podvodno zavarivanje može također poslužiti za popravak zakovica koje propuštaju ili rascjepa na zavarima. Primjeri primjene su još zavarivanje antikorozijskih anoda na podvodnu konstrukciju bušotine, jer su takvi spojevi dokazano pouzdani u teškim vremenski uvjetima (npr. uragan). Transportne tvrtke također vrše podvodne popravke svojih plovila i koriste ih u takvom stanju čak i više od godinu dana prije planiranog remonta. Iako komercijalne organizacije nastoje minimalizirati korištenje podvodnog zavarivanja zbog velikih troškova, ipak smatraju da je to vrlo praktičan način za održavanje. [21]



**Slika 2.3.4 Mokro podvodno zavarivanje [47]**

Radne dubine zavarivača su uglavnom do 5 m, ali napravljeni su pokusi na dubinama većim od 100 m, ali utjecaj hidrostatskog tlaka nepovoljno utječe na održavanje električnog luka, a kvaliteta zavarenog spoja je upitna. Na većim dubinama sigurnost zavarivača dolazi u prvi plan, gdje se nalažu zahtjevi za dodatne mjere opreza. [1]

Oprema za podvodno zavarivanje mora biti dizajnirana za okolišne uvjete, a operater obično nosi kompletnu opremu za ronjenje. Budući da voda uništava oblogu elektrode, elektrode moraju biti vodootporne. Prije upotrebe potrebno je ukloniti zaštitni sloj sa vrha elektrode kako bi se uspostavio električni luk. Operater bi trebao ponijeti sa sobom samo nekoliko elektroda jer vodootporni sloj daje tek kratkotrajnu zaštitu. Elektrode pojedinih proizvođača ne trebaju vodootporni sloj ukoliko se koriste odmah po uranjanju. Većina podvodnog zavarivanja izvodi se sa elektrodama promjera 4 i 5 mm. Elektrode promjera 5 mm preporučljive su za sva zavarivanja osim ako je osnovni materijal tanji. Moguće je koristiti i elektrode visokog učinka koje

zadovoljavaju pri korištenju jednakih tehnika, a dodatno su zaštićene parafinskim slojem. Držači elektroda moraju biti izolirani i osiguravati jednostavnu izmjenu elektroda. Držači su najčešće od plastike i bez opruge, a metalne čeljusti moraju biti pažljivo i u potpunosti izolirane gumom. [21]

Prednosti tehnike mokrog podvodnog zavarivanja:

- jednostavnost i brzina izvođenja postupka zavarivanja
- ekonomska isplativost zavarivanja
- nije potrebno ekstra ulaganje, većinom se koristi standardna oprema
- mobilnost i rasprostranjenost

Nedostaci tehnike mokrog podvodnog zavarivanja:

- pukotine, odnosno krhkost materijala uzrokovano brzim hlađenjem, zakaljivanjem zbog neposrednog kontakta postupka zavarivanja spoja s vodom, dakle smanjena je čvrstoća spoja
- difuzija vodika u metal zavara u velikoj mjeri, stoga je umjerena kvaliteta mokrih zavarenih spojeva [4]

Najveći naglasak odnosi se na sigurnost ronioca-zavarivača pri podvodnom zavarivanju jer prijeti čitav niz opasnosti, tako da oprema mora zadovoljavati sve sigurnosne standarde i udovoljiti uvjetima za rad.

Ronilačka oprema sastoji se od:

- suho ronilačko odijelo (grijano po mogućnosti) kao i maska za suho odijelo
- boce sa stlačenim zrakom i regulacijskim ventilom
- crijevo za vanjsku dobavu zraka, spremnik zraka na površini
- uređaj za komunikaciju

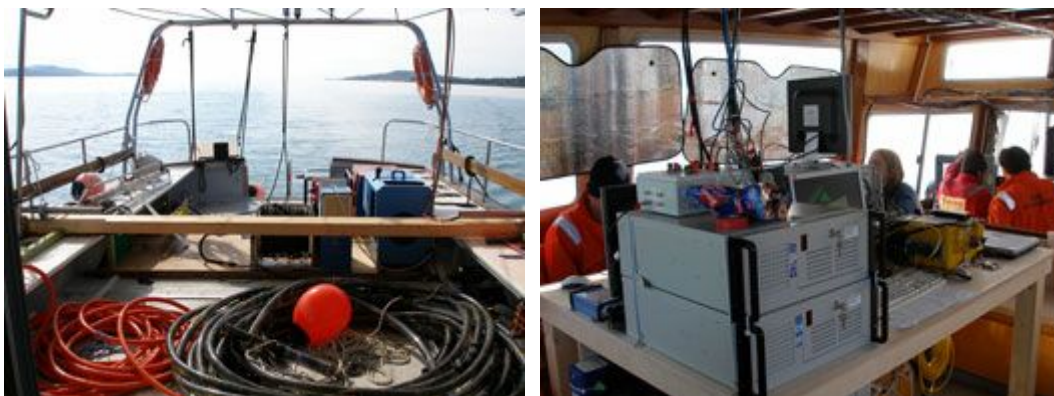


**Slika 2.3.5 Ronilac spreman za ronjenje [48]**



Zavarivačka oprema sastoji se od:

- uređaj za zavarivanje, specijalni kabeli s pojačanom izolacijom
- vodootporni držač elektroda [5]
- sigurnosni prekidač
- raznolike naprave za pridržavanje i centriranje radnih dijelova



**Slike 2.3.6 Oprema na brodu za podvodno zavarivanje [48]**

Preporučeni izvor struje je istosmjerni generator za zavarivanje sa kapacitetom najmanje 300 A spojen na negativni (-) pol. Sigurnosni prekidač mora biti instaliran u strujnom krugu i mora biti isključen cijelo vrijeme osim kad operater zavaruje. Prekidač je jednopolni i propušta struju u jednom smjeru. Treba pripaziti da se funkcija prekidača ne naruši lošom izolacijom ili oštećenjem na kabelu između prekidača i izvora što bi uzrokovalo izbijanje struje. Moguće je korištenje izmjenične struje uz dodatnu zaštitu operatera. Da bi se smanjila opasnost od požara koriste se dizel agregati za pogon istosmjernih generatora.

Kabeli su proizvedeni duljine 15m s jednim muškim i jednim ženskim konektorom sa svrhom smanjenja pada napona. Izolacija od čvrste gumene trake nužna je za podvodne konektore. Dodatak osnovnoj opremi može po potrebi proširiti operater. To uključuje štipaljku za lakši prihvrat na masu. Takodjer je neophodno dlijeto za odstranjivanje morskog raslinja, hrđe i boje. Poželjno je imati žičanu četku kao i čekić za čišćenje osnovnog materijala od troske. [21]

Održavanje opreme za podvodno zavarivanje mora se strogo održavati prema propisanom priručniku, kako bi se osigurala funkcionalnost i sigurnost opreme i produljio vijek trajanja opreme. Svako odstupanje od pravila otvara mogućnost neželjenih događaja kao npr. zatajivanje opreme a time i dovođenje ronioca-zavarivača u opasnost. Neželjeni zastoji donose neželjene troškove, a to se svakako može izbjeći u 99,9 % slučajeva ako se pridržava propisa održavanja.



Norma koja propisuje podvodno zavarivanje AWS D3.6 M:1999 [6,7] , definira četiri vrste zavora;

- **A vrsta zavora**; najkvalitetniji, usporediv sa zavarima provedenim na suhom
- **B vrsta zavora**; dozvoljava prisutnost određenih grešaka i takvi zavori su predviđeni za manje zahtjevna mjesta na konstrukcijama
- **C vrsta zavora**; najniža kvaliteta zavora kod kojeg se traži samo da bude bez pukotina i da zadovoljava geometrijske uvijete izgleda
- **O vrsta zavora**; namijenjen je zavarima koji zadovoljavaju neke druge zahtjeve nekih drugih propisa

Podvodne zavarene spojeve moguće je uspoređivati kvalitetom sa zavarenim spojevima izvedenima na zraku tek kad se postignu uvjeti rada; korištenje ispravne opreme, dobro izvježbanih ronionica-zavarivača i primjereno odabranom tehnikom rada.

### 2.3.2.1. Priprema zavarivanja

Priprema površina kao i oblikovanje izrazito su važni za podvodno zavarivanje. Zavarivanje se ne može izvršiti preko boje, hrđe ili morskog raslinja. Oprema za čišćenje, gore navedena, treba se svakako primjeniti. Dodatak, odnosno pomoć pri čišćenju površina mogu biti pneumatski alati naročito za jako obrasle površine morskim organizmima.



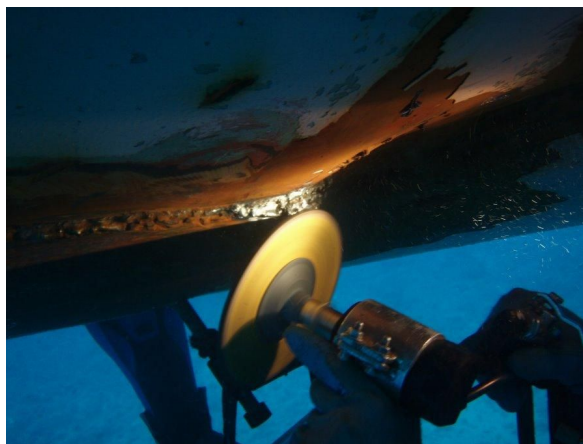
Slike 2.3.7 priprema oblika zakrpe na površini i pripasavanje na oplatu broda [49]

Ploče, zakrpe za zavarivanje pripremaju se na površini, odnosno palubi pomoću brusilice. Oblikovanje je zahtjevan proces s obzirom na oblik površine brodske oplate. Nastoji se u potpunosti postići oblik oplate broda. U praksi nije lako ukloniti sve razjede, ali nastoji ih se

smanjiti koliko je moguće. Razjedi do 1.5mm u potpunosti su zavarljivi, dok razjede do 3mm moguće je zavariti uz pomoć "feeding-in" tehnike koju ćemo kasnije opisati.



**Slika 2.3.8. Ronioc na platformi [50]**



**Slika 2.3.9 Čišćenje brusilicom [50]**

Za ronioca-zavarivača izrazito je važna mirnoća platforme s koje zavaruje. Ako je more nemirno i ako je posao odgodiv do mirnijih morskih struja, svakako tu alternativu treba primjeniti. Ako je moguće, platformu treba pričvrstiti za objekt koji se zavaruje s ciljem postizanja mirnijeg rada. [21]

### **2.3.2.2. Tehnika "self-consuming"**

Kod podvodnog zavarivanja preferira se "self-consuming" tehnika ili tehnika povlačenja. Kad se uspostavi električni luk, elektrodu se pritišće prema radnom komadu u tolikoj mjeri da se dopusti trošenje same od sebe, odnosno koliko treba. Pomoću ove tehnike zavare od 5 mm moguće je zavariti u jednom prolazu s elektrodom promjera 5mm, a zavar ima približnu čvrstoću kao i zavar s tri prolaza. Prednosti su smanjeno vrijeme zavarivanja, nema čišćenja troske između prolaza i jednostavno održavanje takvih zavora. Najčešće podvodno zavarivanje je zavarivanje kutnog spoja, a "self-consuming" tehnika naročito je povoljna u situacijama slabe vidljivosti kao i kod nemirnih uvjeta rada. Višeslojno zavarivanje je otežano nakon prvog prolaza zato što se izgubila linija za kontroliranje i vođenje električnog luka. [21]

### 2.3.2.3. Horizontalni položaj zavarivanja

S ispravnim parametrima dobivenima iz izvora struje i s prekinutim strujnim krugom sigurnosnim prekidačem, horizontalni zavareni spojevi izvode se na ovaj način: [21]

1. Zavarivač-ronioc, operater postavlja elektrodu na spoj pod kutem između linije spoja i elektrode od 15 do 45°.
2. Operater javlja "uključi struju", zatim se uspostavlja električni luk kad sigurnosni prekidač zatvori strujni krug ili se strujni krug ostvari naknadnim lupkanjem ili grebanjem elektrode o radni komad.
3. Kad se električni luk uspostavi, održavanje električnog luka elektrode sa radnim komadom prepušta se vođenju samotrošeće elektrode. Luk se ne održava na isti način kao i na zraku. Kut zavarivanja, koji odgovara operateru, održava se kad se otpočne sa zavarivanjem. Vođenje električnog luka je ravno, bez njihanja sve do kraja spoja ili istrošenja elektrode. Održava se konstantni pritisak elektrode na radni komad. S otprilike 200mm depozita je postignuto od elektrode duljine 250mm.
4. Kad se elektroda potroši, operater kaže "struja stop" i on dalje zadržava poziciju elektrode sve dok ne dobije potvrdu nazad "struja stop" od čovjeka na palubi. Kad je osiguran sa isključenjem strujnog kruga pomoću sigurnosne sklopke, operater je spreman zamjeniti elektrodu.
5. Prije nastavka zavarivanja s novom elektrodom kraj depozita (ili cijeli sloj, ako je višeslojno zavarivanje) treba se očistiti od troske. Depozit nove elektrode trebao bi lagano prelaziti preko prethodnog sloja.
6. Nova elektroda mora biti u poziciji na radnom komadu prije nego operater ponovno pozove "uključi struju".

Mjehurići stvoreni za vrijeme zavarivanja naročito narušavaju vidljivost. Kod horizontalnog zavarivanja smetnja vidljivosti je manja kad operater zavaruje prema sebi, dok je otežana vidljivost kad zavaruje od sebe. Vertikalni zavari trebali bi se izvoditi odozgo prema dolje iz istih razloga.

### 2.3.2.4. Vertikalni i nadglavni zavari

Za vertikalno zavarivanje koristi se ista tehnika kao i kod horizontalnog zavarivanja. Podešenja parametara na izvoru struje mogu biti korisne kao i proizvoljni odabir kuta za zavarivanje. Optimalni parametri za nadglavno zavarivanje poprilično su ograničeni tako da su

probe na uzorcima obično potrebne. Problemi neprovarenosti i konveksnosti često se zaobiđu ako je penetracija i protaljivanje dobro. Održavanje luka pod kutom od 35 do 55° između linije spoja i elektrode, kao i sporim, mirnim vođenjem spriječit ćemo takve nepravilnosti zavarenog spoja. Takva tehnika zavarivanja zahtjeva vještinu koja se dostigne tek nakon dugotrajnog uvježbavanja zavarivača. Pogreška u izvođenju nadglavnog zavarivanja kao što je procurjeli korijen uzrokovana je jakom strujom ili pritiskom zavarivača na elektrodu ili oboje.



**Slike 2.3.10 Nadglavno i vertikalno zavarivanje [51]**

Iako se loša priprema oblika zakrpe, ako je moguće izbjegava, zadovoljavajući zavareni spojevi su postizivi ako je razmak čak i do 3 mm. Tada se primjenjuje tehnika "feeding-in", koja jednostavno znači da se elektroda troši brže nego normalno sa "self-consuming" načinom zavarivanja. Tako umjesto 200 mm depozita, dobije se 150 mm od elektrode duge 250 mm. Brzo skrutnuće zavarenog spoja sprječava curenje kao što bi se dogodilo da se zavarivanje sa tim parametrima izvodi na zraku. [21]

#### **2.3.2.5. Opasnosti od kojih se treba zaštititi**

Zaštita zavarivača od električne struje uzeta je već pri samom korištenju opreme i procedure podvodnog zavarivanja. Postoje druge opasnosti koje mogu promaknuti. Tako postoji opasnost od eksplozije prilikom nakupljanja vodika u zatvorenim ili u odjeljcima neadekvatne ventilacije. Iz mjehurića prilikom zavarivanja nastane i do 70% vodika. Za vrijeme nastanka taj vodik nije u mogućnosti sagorijeti zbog nedostatka kisika u tom okruženju. Vodik odlazi iznad

vode i nakuplja se u odjeljcima gdje postoji zrak, tako da nastane plinska mješavina s eksplozivnim svojstvima i uz prisutnost iskre ili plamena dolazi do eksplozije. Prije nego se započne sa zavrivanjem, zatvoreni odjeljci u kojima je moguće nakupljanje vodika, moraju se ventilirati. [21]

### 2.3.3. Ručno-elektrolučno mokro zavarivanje

Za popravke i održavanje, REL mokro zavarivanje prednjači po svojoj fleksibilnosti i ekonomičnosti, a najviše se ističe fleksibilnost primjene, te niski troškovi opreme za zavarivanje. REL postupak mokrog zavarivanja najčešće je korištena tehnika baš zbog svoje izuzetne primjenjivosti i prilagodljivosti. [1]

Sa ciljem postizanja što bolje kvalitete podvodnog zavarivanja potrebno je udovoljiti osnovnim uvjetima za podvodno mokro zavarivanje. Prvi i osnovni uvjet je educiranost i uvježbanost ronioca-zavarivača. Najveća pozornost za vrijeme edukacije daje se tehnici



**Slika 2.3.11 REL mokro podvodno zavarivanje [44]**

zavarivanja, jer nepravilna tehnika zavarivanja uzrokuje povećanje unosa, odnosno difuziju vodika kao i porozitet u metalu zavora, a nepravilan nagib elektrode dovodi do uključina troske u metalu zavora. [1]

Da bi se električni luk pravilno održavao, a prije toga i uspostavio, potrebno je pravilno odabrati elektrode koje su obložene i premazane sa ciljem zaustavljanja prodora vode u oblogu i ostvarivanja mirnijeg električnog luka. Održavanje električnog luka pod vodom ostvaruje se u parno-plinskom mjehuru koji nastaje taljenjem elektrode, obloge i isparavanjem vode koja je u neposrednom kontaktu sa električnim lukom. [1]

Obloge su danas tajne proizvođača dok su prvi nepropusni premazi bili na neki način improvizacija: papir, izolir-traka, parafin; jer bilo je pokušaja zavarivanja bez vodo-nepropusnih premaza, ali pokazano je da je to nemoguće uspješno izvesti. Treba naglasiti posebnost elektroda sa dvostrukim premazom koje posjeduju dobra svojstva dvaju premaza na jednoj elektrodi. Prvi sloj, električki provodljiv, omogućava ronioncu-zavarivaču jednostavnu uspostavu električnog luka kao i stabilnost istog. Inače, kod komercijalnih elektroda, prilikom struganja vrha radi uspostave električnog luka dolazi do oštećivanja obloge i postoji mogućnost prodora vode u oblogu. Drugi, vanjski sloj je električni izolator, ali ima bolja mehanička svojstva i omogućava izvanrednu propusnost kao i upotrebu ovakvih elektroda u kemijski agresivnim sredinama i u većim dubinama [10]. Odabir primjerenog izvora za zavarivanje osigurava dobre parametre zavarivanja. Konstrukcija ispravljača je takva da imaju smanjeni napon i primjerena svojstva za zavarivanje. Zavarivanje na većim dubinama mijenja karakteristiku električnog luka, pa se zato preporuča upotreba uređaja sa dvostrukom regulacijom, odnosno izborom napona praznog hoda i jakosti struje (radi bolje kontrole i unosa topline). Odlična izolacija svih kabela i držača elektrode je važna zbog sigurnosti, odnosno da bi se spriječilo probijanje struje. Zbog disipacijskih efekata, parametri zavarivanja moraju biti 10-15% veći u odnosu na suho zavarivanje. Da bi smo mogli izvoditi sve podvodne zavarivačke radove, potreban je izvor istosmjerne struje od minimalno 300A. [1]

Optimalni parametri struje za podvodne radove drugačiji su od onih izvedenih na zraku i također variraju zbog duljine kabela (vodiča) kao i debljine lima. Neki put parametri mogu biti i do 30% viši kao što bi dovoljno bilo na zraku, a sve zbog vodenog okruženja koje brzo odvodi toplinu. Preporučljivo je izvođenje eksperimentalnih radova pod sličnim uvjetima rada kako bi se našli najpovoljniji parametri za samotrošću tehniku. Najčešći odabir elektrode za podvodno zavarivanje je elektroda promjera 5 mm. Elektroda E6013 preporučljiva je za zavarivanje svih pozicija, a struje za izvođenje takvih radova kreću se od 220 do 240 A. Napon uglavnom biva konstantan pri samotrošćoj tehnici, dok količina rastaljenog materijala proporcijonalna je stuji zavarivanja. [21]



## 2.4. Fizikalne osnove podvodnog zavarivanja

Mokro podvodno zavarivanje REL postupkom najstarija je tehnika zavarivanja metala pod vodom. Primjenjivana je za popravak oplata brodova i podvodnih konstrukcija. Smatrana je tehnologijom drugog reda zbog loših mehaničkih svojstava zavarenog spoja. Danas mokro podvodno zavarivanje ima značajan industrijski, komercijalni i ekonomski potencijal pri izgradnji i održavanju podvodnih objekata te je zbog znatno nižih troškova i bolje fleksibilnosti u prednosti pred postupcima suhog podvodnog zavarivanja pri čemu se postiže visoka kvaliteta zavora. To je prvenstveno moguće zbog velikih napora na razvoju dodatnih materijala, izvora struje za zavarivanje, razumijevanju prijenosa metala i reakcija u električnom luku i razvoju ostale opreme. Tu se ne smije isključiti ronioce-zavarivače kao ni edukacijske programe koji su tome pridonijeli. Međutim, daljnji razvoj osnovnih materijala, veliki broj instaliranih i planiranih podvodnih objekata i cjevovoda kao i povećanje dubine zahtijevaju daljnji razvoj postupaka mokrog podvodnog zavarivanja. Jasno je da se pri tome REL postupak nalazi pred velikom preprekom nemogućnosti automatizacije što ga ograničava za primjenu na manjim dubinama do 60 m, a drugi postupci poput zavarivanja praškom punjenom žicom postaju primarni za daljnja istraživanja. [16]

Mokro podvodno zavarivanje REL postupkom karakterizira slijedeće [16]:

1. Nestabilnost električnog luka što uzrokuje nepravilnu geometriju zavarenog spoja, uključke troske, porozitet i nedovoljnu penetraciju.
2. Brzo hlađenje dovodi do visoke tvrdoće u zoni utjecaja topline, niske žilavosti zavarenog spoja i pojave poroziteta zbog zarobljavanja plinskih mjehurića.
3. Visok sadržaj vodika u stupu električnog luka, kapljicama rastaljenog metala u prijenosu i talini zavora što dovodi do zarobljavanja vodika u metalu zavora i zoni utjecaja topline. To povećava osjetljivost na pojavu hladnih pukotina, uzrokuje porozitet i degradira mehanička svojstva spoja.
4. Visok sadržaj kisika u stupu električnog luka, kapljicama rastaljenog metala u prijenosu i talini zavora što dovodi do oksidacije, snižavanja udjela legiranih elemenata i degradacije mehaničkih svojstava.
6. Raspad i otapanje obloge elektrode što rezultira nestabilnošću električnog luka i pojavom poroziteta.

Inferiorna kvaliteta mehaničkih svojstava podvodnih mokrih zavara direktna je posljedica vodenog okruženja. Kada se steknu uvjeti da se formira zavarivački strujni krug i uspostavi električni luk, moguće je započeti s procesom zavarivanja. Aktivni dijelovi električnog luka, stup, katodno i anodno područje, nisu u direktnom dodiru s tekućinom. Kod mokrog podvodnog zavarivanja obloženom elektrodom energija luka je tako intenzivna da sva voda oko električnog luka trenutno ispari pa se stvara relativno stabilan mjehurić oko vrha elektrode koji se održava sve do prekidanja električnog luka. [16]

Mjehurić ima višestruku ulogu i utjecaj na proces zavarivanja: [16]

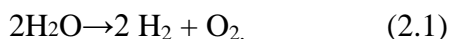
1. Osigurava zaštitu pri prijenosu rastaljenog metala i štiti talinu na osnovnom materijalu.
2. Smanjuje brzinu hlađenja metala zavara i zone utjecaja topline.
3. Kod postupaka s plinskom zaštitom, zaštitni plin kolidira s mjehurićem pa se smanjuje efekt zaštite i utjecaja zaštitnog plina.
4. Plinovi u mjehuriću utječu na formiranje poroziteta.
5. Zbog visoke temperature električnog luka, stvaraju se uvjeti za pojavu atomarnog vodika koji lako difundira u metal zavara i zonu utjecaja topline.

Kako se električni luk kod podvodnog mokrog zavarivanja podržava u parno-plinskoj atmosferi nastaloj od izgaranja i raspadanja obloge elektrode i disocijacijom vode u električnom luku, dolazi do stalnog rasta mjehurića do trenutka kada njegov polumjer postane tangenta inicijalne praznine, slika 2.1. Tada se mjehurić odvaja dok istovremeno počinje stvaranje i rast novog mjehurića.

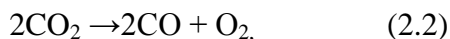
Mogućnost elektrolučnog zavarivanja pod vodom zasniva se na sposobnosti luka da automatski regulira svoje energetske stanje. Ako se pojača hlađenje bilo kojeg dijela luka, npr. površine katodne mrlje, onda se u hlađenoj zoni pojačava izdvajanje energije, što se manifestira povećanjem pada napona na hlađenoj sekciji, te se hlađenje kompenzira povećanim generiranjem topline. Zbog toga električni luk pod vodom tali metal isto tako intenzivno kao i na zraku, bez obzira na intenzivno odvođenje topline uzrokovano fizikalnim svojstvima sredine koja ga okružuje. Vodik koji nastaje toplinskom disocijacijom vode, čini veći udio u plinu koji nastaje prilikom mokrog podvodnog zavarivanja. Kisik, koji se oslobađa pri istom procesu, izgara materijal elektrode. Pare metala i komponente obloge, regirajući s vodom, kondenziraju u sitne čestice, koje se pretežito sastoje od oksida željeza, a u vodi čine koloidni rastvor sivo-crne boje, koji se ne taloži. [16]



Disocijacija vode pri mokrom podvodnom zavarivanju odvija se prema reakciji te raste parcijalni tlak vodika i kisika u električnom luku:



Uz to, ugljik koji dijelom nastaje izgaranjem obloge elektrode s kisikom stvara ugljični dioksid koji također disocira prema reakciji:



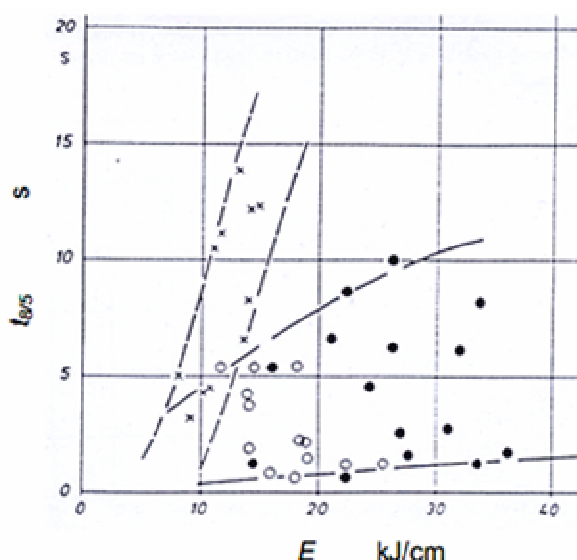
Prema navedenim reakcijama, isparavanjem i disocijacijom vode te sagorijevanjem obloge dolazi do stvaranja plinova sljedećeg sastava:

- 62-82%  $\text{H}_2$  (vodik)
- 11-24%  $\text{CO}$  (ugljični monoksid)
- 4-6%  $\text{CO}_2$  (ugljični dioksid)
- $\text{O}_2$  (kisik)
- $\text{N}_2$  (dušik)

Sastav nastalih plinova ostaje uglavnom isti, bez razlike da li se radi o slatkoj ili slanoj vodi. Sastav plina u porama pokazao je da se u porama nalazi između 96 i 99% vodika, a ostatak je ugljični monoksid. Modeli stvaranja pora pokazali su da se kritičan radijus za stvaranje pore smanjuje s povećanjem tlaka. Kritični radijus je minimalna veličina pri kojoj je pora stabilna. Što je kritični promjer niži, lakše dolazi do nukleacije pora. To su dokazala istraživanja koja pri kojima je pokazano da poroznost raste s povećanjem dubine. Pri mokrom podvodnom zavarivanju moguće je regulirati samo dva parametra koji utječu na pojavu pora a to su brzina hlađenja i koncentracija vodika. Za postizanje najboljih rezultata u smislu produžavanja vremena skrućivanja i smanjenja koncentracije vodika preporuča se gibanje taline u kupki što se postiže transversalnim njihanjem elektrode ili djelovanjem vanjskog magnetskog polja.

Hlađenje u vodenom okruženju znatno je intenzivnije od hlađenja u normalnim uvjetima. Iako plinski mjehur donekle izolira proces zavarivanja, brzina odvođenja topline s radnog komada u vodu je intenzivna. Na slici 2.4.3 prikazan je utjecaj unosa topline na  $t_{8/5}$ .

Vremena hlađenja od 800 do 500°C su, ovisno o uvjetima i parametrima zavarivanja, između 2 i 4 sekunde. Da bi se produžila, provedena su brojna istraživanja pri kojima su primijenjene posebne izolacijske mase ili pak prilagodbe postupaka zavarivanja. Takva rješenja znatno povećavaju zahtjeve pri izvedbi u realnim uvjetima te nisu primjenjiva za sve oblike konstrukcije. [16]

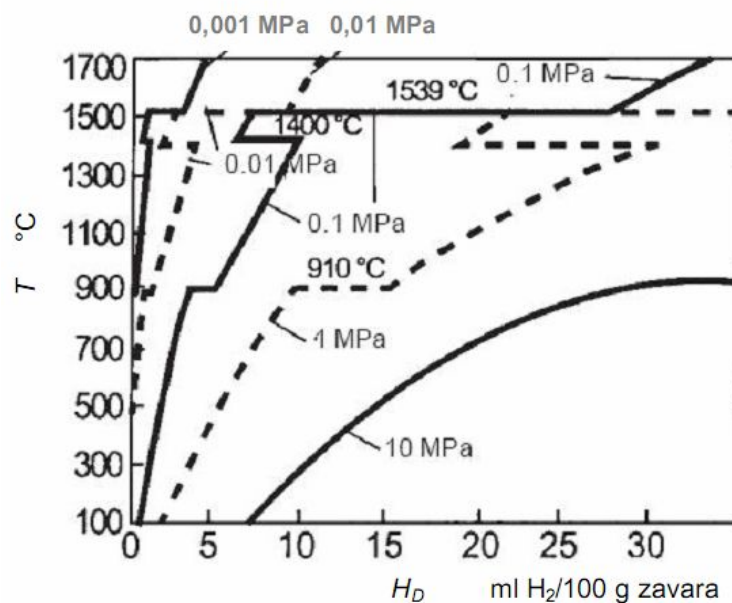


**Slika 2.4.1** Dijagram ovisnosti  $t_{8/5}$  o unosu topline za zavarivanje u normalnim uvjetima i pri mokrom podvodnom zavarivanju obloženom elektrodom; osnovni materijal St 37-2, debljina 20mm; mokro podvodno zavarivanje ○ - rutilno-celulozna obloga, ● rutilna obloga; x-zavarivanje u normalnim uvjetima, rutilna obloga [16]

Direktan pristup vode mjestu zavarivanja ima nekoliko negativnih posljedica na svojstva zavarenog spoja. Zbog brzog hlađenja, dolazi do stvaranja lokalno zakaljene strukture visoke tvrdoće u zavarenom spoju čija tvrdoća nerijetko prelazi 350 HV10 u zoni utjecaja topline. Uz to, visok udio difundiranog vodika koji se kreće u granicama između 30 i 80 ml  $H_2$ /100g zavora, čini takvu strukturu osjetljivom na pojavu vodikove krhkosti, tj. dovodi do pojave pukotina uzrokovanih vodikom. Takvoj situaciji pridonosi i niz mikropora, koje nastaju zbog brze solidifikacije i nemogućnosti otplinjavanja metala zavora. Prema nekim istraživanjima, sadržaj vodika u materijalu raste i zbog primjene katodne zaštite pri čemu na površini metala nastaje atomarni vodik koji brzo difundira u rešetku materijala. To je posebno intenzivno ako se u npr. radnom mediju cjevovoda nalazi  $H_2S$  pri čemu koncentracija vodika raste s koncentracijom  $H_2S$ .

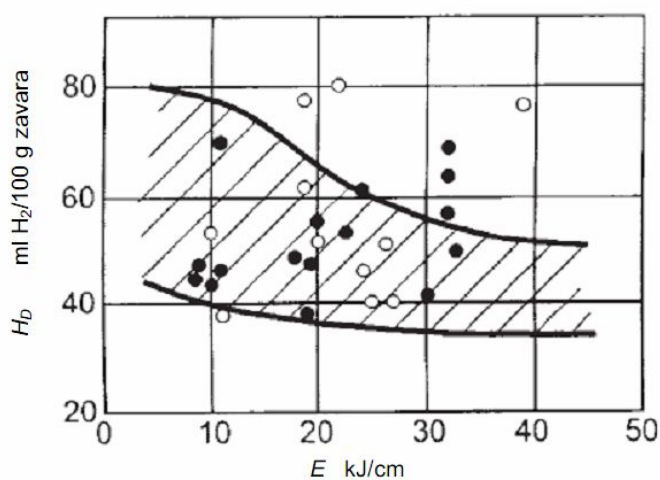
Povišeni udio vodika u zavaru posljedica je povišenog parcijalnog tlaka vodika u električnom luku. Glavni izvor vodika je vodena para, koja na visokim temperaturama disocira na vodik i kisik. Vodik u zavar može doprijeti i iz obloge elektrode, posebno ako je obloga kontaminirana vlagom pri proizvodnji ili tijekom rukovanja.

Uz to potrebno je spomenuti da je udio vodika u metalu zavora pri mokrom podvodnom zavarivanju veći i zbog povišenog hidrostatskog tlaka, koji je uvijek viši nego je to slučaj kod zavarivanja na zraku. To znatno utječe na rastvorljivost plina u metalu. S porastom tlaka rastvorljivost vodika u talini čelika raste pri čemu također raste i udio vodika u metalu zavora, slika 2.4.4 [16]



**Slika 2.4.2 Rastvorljivost vodika u željezu ovisno o tlaku i temperaturi [16]**

Unos topline, osim na mikrostrukturu i mehanička svojstva zavara, utječe i na količinu difundiranog vodika. Iako se velikim povećanjem unosa topline, a zbog visokog intenziteta hlađenja, ne utječe znatno na produženje vremena hlađenja, zabilježen je utjecaj unosa topline na količinu difundiranog vodika, slika 2.4.5.



**Slika 2.4.3 Utjecaj unosa topline na količinu difundiranog vodika pri mokrom podvodnom zavarivanju čelika St 37-2 ( $I=180$  do  $250\text{ A}$ ,  $U=28$  do  $48\text{ V}$ ,  $v_z=11$  do  $21\text{ cm/min}$ , ●-E4332, ○-E5122) [16]**

Na apsorpciju vodika, osim sastava obloge i parametara zavarivanja, znatno utječe i polaritet elektrode. Dokazano da se manje vodika apsorbira ako je elektroda na negativnom polu.

To se objašnjava nižom temperaturom na katodi koja uzrokuje sporije reakcije između troske i okoline. U slučaju kada je obložena elektroda anoda apsorpcija vodika se odvija u talini metala na osnovnom materijalu. Sasvim suprotan proces se odvija kada je obložena elektroda katoda gdje se apsorpcija vodika odvija na vrhu elektrode.

Povećani udio vodika te difuzija kroz rešetku koja slijedi nakon toga predstavlja značajan problem u zoni utjecaja topline s aspekta pojave hladnih pukotina. Vjerojatnost pojave ove vrste pukotina raste s porastom brzine hlađenja, a koja je kod podvodnog mokrog zavarivanja (i do  $300^{\circ}\text{C/s}$ ) i nekoliko puta veća u odnosu na hlađenje na zraku. Visoka brzina hlađenja pri mokrom podvodnom zavarivanju je posljedica brzog odvođenja topline s područja zavarivanja u okolinu. Osim toga, brzo hlađenje pri mokrom podvodnom zavarivanju povećava deformaciju kristalne rešetke u zoni utjecaja topline te je pojava krhkosti zbog vodika koji pristiže iz metala zavara znatno povećana. Brzo hlađenje uzrok je stvaranju krhkih zakaljenih struktura koje povećavaju rizik od pojave pukotina. Kod gotovo svih podvodnih zavara pokazano je da postoji lokalno stvaranje martenzitne strukture tik uz liniju staljivanja. Širine ovog međusloja obično ne prelazi 0,5mm. Ovaj međusloj u zavarenom spoju uvelike povećava opasnost od nastanka hladnih pukotina, jer osim strukturalne krhkosti ovog sloja, u ovom se području nakon zavarivanja nalazi maksimalna koncentracija vodika. Zbog niskog koeficijenta difuzije vodika u martenzitu, priljev vodika iz metala zavara je znatno viši od odljeva vodika u osnovni materijal. Na taj način, martenzitni međusloj djeluje kao barijera koja sprječava difuziju vodika. [16]

Prema iskustvima iz prakse, nelegirani konstrukcijski čelici s ekvivalentom ugljika CE između 0,35 i 0,4% te granicom tečenja ispod  $345\text{ N/mm}^2$  nisu osjetljivi na pojavu hladnih pukotina pri mokrom podvodnom zavarivanju. Međutim, metode određivanja zavarljivosti primjenom mokrog podvodnog zavarivanja su konvencionalne te često ne uzimaju u obzir udio difundiranog vodika kao i naprezanja u zavarenom spoju.

Osjetljivost na pojavu hladnih pukotina se puno kvalitetnije može procijeniti na temelju ispitnih uzoraka koji uzimaju u obzir udio vodika u zavaru. Treba napomenuti da do sada nisu provedena istraživanja ili napravljeni modeli koji bi definirali maksimalno dozvoljenu granicu udjela vodika u zavarenom spoju, koja bi garantirala da neće doći do pojave hladnih pukotina, a da je pri tom zavar načinjen podvodnim mokrim zavarivanjem. Podaci koji vrijede za normalne uvjete nisu primjenjivi u vodenom okružju. Vrlo je važno provesti istraživanja kako bi se definirala korelacija između koncentracije vodika i sklonosti pojavi pukotina pri mokrom podvodnom zavarivanju za određenu vrstu čelika.

Pri mokrom podvodnom zavarivanju čelika s CE  $>0,4\%$  i granicom tečenja višom od  $345\text{ N/mm}^2$  moguće je koristiti austenitne dodatne materijale zbog znatno više rastvorljivosti

vodika u FCC rešetki. Zbog miješanja osnovnog i dodatnog materijala, na granici stajivanja nastaju formacije krhkih međuslojeva martenzita s visokim koncentracijama difundiranog vodika. Međutim, čak i kada su korišteni austenitni materijali, primijećene su hladne pukotine u zoni utjecaja topline. S druge strane, austenitni dodatni materijali su jako osjetljivi na pojavu toplih pukotina pri skrućivanju.

Područja s povećanom tvrdoćom, kao i zone zaostalih naprezanja direktno su povezana s visokim brzinama hlađenja zavara u vodi i sadržajem ugljika. Zaostala naprezanja egzistiraju i zavarima izvedenima u normalnim uvjetima, međutim u podvodnim zavarima u sprezi s drugim faktorima predstavljaju velike poteškoće. Brzina hlađenja podvodnih mokrih zavara vrlo je velika zbog visokog specifičnog toplinskog kapaciteta vode, kao i radi dobrog provođenja topline mehanizmom konvekcije iz zavara prouzročenom gibanjem vode nastalom zbog dinamičnog generiranja ili kolabiranja mjehurića oko električnog luka. Visoke brzine hlađenja rezultiraju visokim vrijednostima tvrdoće u ZUT-u, te niskom žilavošću u području ZUT-a nastalima zbog visoke koncentracije martenzita, učestalom pojavom poroziteta, uključaka troske te pojavom ugorina. [16]

Razvidno je da se veći dio istraživanja i radova usmjerava na razvoj tehnologije zavarivanja, dok se samo mali dio bavi istraživanjem problematike vezane uz povećani sadržaj vodika i mogućih posljedica. Trenutno je jedan od glavnih problema razvoj tehnike podvodnog zavarivanja i dodatnih materijala koji ostvaruju minimalnu koncentraciju vodika u metalu zavara. Treba naglasiti da se postupkom zavarivanja, odabirom parametara i dodatnog materijala može utjecati na sadržaj vodika u zavaru. To je još značajnije kada se ima u vidu činjenica da je većina istraživanja o zavarljivosti čelika za cjevovode provedena i realizirana u normalnim uvjetima. Međutim, primjena takvih materijala za podvodne cjevovode znatno povećava složenost i mogućnost izvedbe mokrog podvodnog zavarivanja u realnim uvjetima.

## 2.5. Vodikove pukotine i mehanizmi nastanka

Povezanost hladnih pukotina i mokrog podvodnog zavarivanja prirodno je određena postojanjem svih kritičnih faktora a to su vodik, lokalno zakaljena struktura i zaostala naprezanja. Kako se pri mokrom podvodnom zavarivanju predgrijavanje i usporeno kontrolirano hlađenje ne provode zbog ekonomsko tehničkih čimbenika nužno je minimalizirati pojavu hladnih pukotina optimalnim parametrima zavarivanja, mikrolegirnim dodacima u dodatnom materijalu ili utjecajem zaštitnog plina te prihvatljivim termodinamičkim ciklusima. Svakako treba napomenuti da svi konvencionalni postupci ispitivanja materijala na pojavu hladnih pukotina nisu praktično primjenjivi za uvjete koji egzistiraju u mokrom podvodnom zavarivanju. Osim navedenog u obzir se moraju uzeti uvjeti eksploatacije i karakter transportiranog medija jer postoji mogućnost pojave vodikom uzrokovanih pukotina i bez zavarivanja.

Generalno, vodik pri konvencionalnim postupcima zavarivanja dolazi iz vlage pohranjene u oblogi elektrode kod REL zavarivanja ili prašku kod EPP i FCAW zavarivanja. Kod postupaka s plinskom zaštitom, tj. TIG i MIG/MAG česta je pojava unosa vodika iz zaštitnog plina. Uz vlagu, iz obloge vodik se pojavljuje iz krutih spojeva vode i konstituenata obloge, npr. ugljikovodici u celulozi, hidratirani oksidi iz produkata hrđe ili kristalna voda vezana u glini ili azbestu. Uz to, vodik se apsorbira iz prljavštine na radnom komadu ili dodatnom materijalu u obliku masti, ulja i sl.

Kod mokrog podvodnog zavarivanja situacija je znatno drugačija jer veliki dio vodika dolazi iz stupa električnog luka gdje vodena para disocira na vodik i kisik. Time se parcijalni tlak vodika u mješavini plinova u stupu električnog luka povećava.

Pukotine inducirane vodikom karakterizira krhki lom inače duktilnih materijala pri kontinuiranom opterećenju i uz prisutnost vodika, i to pri naprezanju nižem od granice tečenja. Mehanizam pukotine se općenito opisuje kao podkritična (eng. sub-critical) propagacija pukotine koja često uzrokuje zakašnjele prijelome, te ovisi o koncentraciji vodika, čvrstoći materijala, mikrostrukтури, naprezanjima i temperaturi.

Vodikova krhkost tj. pojava pukotina induciranih vodikom je prvenstveno fenomen povezan s feritnim čelicima i grubozrnatom lokalno zakaljenom strukturom ZUT-a. Te pukotine se najčešće javljaju u ZUT-u, ali se vremenom mogu pojaviti i u metalu zavara. Proces pojave vodikovih pukotina je vremenski zavisna, što znači da se one mogu javiti u različitim vremenskim intervalima nakon zavarivanja.

Mehanizme vodikovih pukotina definiraju slijedeće činjenice: [16]

1. Ovisnost o vrsti kristalne rešetke; pojava vodikovih pukotina se veže uz BCC i BCT kristalne rešetke tj. feritne i martenzitne čelike. Austenitni čelici i aluminijske legure koje imaju FCC rešetku nisu osjetljive na pojavu vodikovih pukotina.
2. Ovisnost o mikrostrukturi; martenzitni čelici su osjetljiviji na pojavu vodikovih pukotina od feritnih čelika, ali martenzitna mikrostruktura nije nužni preduvjet za inicijaciju pukotine.
3. Ovisnost o promjeni intenziteta naprezanja; vodikova krhkost se javlja pri vlačnim naprezanjima sporog intenziteta promjene. Kod brzog porasta naprezanja difuzija vodika se ne odvija dovoljno brzo da bi držala korak s propagacijom pukotine, tj. ne dolazi do nakupljanja vodika oko vrška pukotine.
4. Ovisnost o temperaturi; vodikove pukotine se najčešće javljaju u intervalu od 150°C do 200°C. Ovisnost o temperaturi ukazuje da su za propagaciju pukotine nužne kritične veličine sadržaja vodika i veličine naprezanja oko vrška pukotine.
5. Ovisnost o vremenu; kako je proces pojave vodikovih pukotina kontroliran difuzijom vodika, pukotine će se širiti u "stepeničastom" obliku kako bi se omogućio dolazak vodika na sami vršak pukotine iz okolne matrice.

Uz pojavu vodikovih pukotina veže se pojam tzv. zamki, tj. lokacija na kojima dolazi do skupljanja vodika.

Postoji klasifikacija tih zamki prema veličini:

- točkaste (elementi poput Mn, Ti, Cr, Nb itd.);
- linearne (dislokacije);
- planarne ili bidimenzionalne (površine čestica, granice zrna itd.);
- volumne ili prostorne (šupljine, pukotine, čestice).

Zamke mogu biti reverzibilne ili ireverzibilne ovisno o tome da li je vodik čvrsto vezan ili se može lagano otpustiti. Uz to, zamke mogu biti mobilne (dislokacije) ili stacionarne (čestice).

## 2.6. Pregled metoda određivanja vodika u zavarenim spojevima

Vodik već pri sobnim temperaturama vrlo brzo difundira te mogu nastati značajni gubici tj. greške u mjerenju. Uz to, koncentracije koje se mjere su vrlo niske, red veličine ppm – dijelova na milijun (eng. parts per million), odnosno promil, tako da su potrebne stroge procedure i postupci.

Kako bi se mogli uspoređivati rezultati iz različitih ispitnih ustanova načinjene su standardne procedure.

Standardizirane metode koje se danas najčešće koriste su slijedeće: [16]

- Japanska metoda (JIS Z 313 -1975) koja se razvila iz bivše ASTM A 316-48T metode. Ova metoda se bazira na sakupljanju difundiranog vodika u glicerinu iz jednog navara u roku 48h na temperaturi 45°C. Količina vodika se izražava u ml na 100g nataljenog metala. Od prekidanja električnog luka do pothlađivanja epruvete dozvoljeno je vrijeme od najviše 5s.
- Francuska metoda (N.F.A. 81-305-1975) pri kojoj se dva sloja deponiraju na žice smještene u bakrenom kalupu. Vodik iz ovih navara se skuplja u živi i količina se iskazuje u ml na 100g protaljenog metala u što je uključen i rastaljeni osnovni metal.
- Metoda IIW-a (International Institute of Welding) pri kojoj se na izvaganu čeličnu epruvetu smještenu u bakrenom nosaču nanosi navar. Epruveta se pothlađuje u strogo propisanom režimu. Vodik difundira na temperaturi od 25°C u roku 72h i skuplja u živi. Dobivena količina se izražava na dva načina: ml na 100g nataljenog materijala, oznaka  $H_D$  ili u ml na 100g protaljenog metala koji uzima u obzir poprečni presjek zavara, oznaka  $H_F$ .



## 2.7. Čelici povišene čvrstoće općenito

Cilj razvoja ovih čelika je postignuće više granice razvlačenja i više vlačne čvrstoće, a time i višeg dopuštenog naprezanja u radu. Primjenom ovih čelika smanjuju se nosivi presjeci kod jednakih opterećenja, odnosno smanjuje se masa i volumen konstrukcije, što dovodi do sniženja ukupnih troškova materijala. Kod strojeva i vozila manja masa znači i manji utrošak pogonske energije i smanjenje gubitka zbog inercijskih sila kod pokretanja i zaustavljanja itd. Nadalje, u razvoju čelika povišene čvrstoće nastojao se zadržati povoljan omjer  $R_e/R_m$  (0,70...0,85), tzv. "plastična rezerva", tako da u slučaju preopterećenja prije dolazi do plastične deformacije, a ne do iznenadnog loma. Zadržavanjem što nižeg %C i eventualno niskim udjelima legirnih elemenata zavarljivost ostaje zadovoljavajuća. [9]

Čelike povišene ili visoke čvrstoće treba primjenjivati uzimajući u obzir sljedeće činjenice:

-kod nekih tlačno opterećenih konstrukcija tankih presjeka može se pojaviti povećano izvijanje, a kod savijanja veliki progib. To su npr. dugačke mostne konstrukcije, dizalice, dugački brodovi i sl. Dakle, vidljiv je problem krutosti, odnosno stabilnosti konstrukcije. Krutost nije određena samo granicom razvlačenja, nego poglavito modulom elastičnosti, koji je gotovo jednak za sve čelike. Zbog toga u tim uvjetima opterećenja, primjena ovih čelika ne donosi bitne prednosti;

- korozija dodatno smanjuje debljinu stijenke pa se vremenom smanjuje nosivost presjeka i o tome se mora voditi računa pri dimenzioniranju presjeka;
- kod ovih čelika dinamička izdržljivost i otpornost na naglo širenje pukotina nisu proporcionalno povišeni s granicom razvlačenja. Čelici su osjetljivi na zarezno djelovanje pa je potreban oprez kod primjene u uvjetima promjenjivog dinamičkog opterećenja;
- porastom granice razvlačenja opada deformabilnost, a raste osjetljivost prema pojavi krhkog loma.

Povišenje čvrstoće čelika ponajprije ovisi o mogućnostima modificiranja njegove mikrostrukture. Tako se čelici s jednofaznom mikrostrukturom ferita ili austenita ne mogu očvrstnuti kaljenjem, ali su zato očvrstljivi precipitacijom (uz dodatak odgovarajućih legirnih elemenata). Svi načini povišenja čvrstoće temelje se na otežanom kretanju dislokacija nastajanjem prepreka. Posljedica je obično povišenje granice razvlačenja dok vlačna čvrstoća ne mora rasti.

Osnovni mehanizmi (načini) očvrstnuća – povišnja granive razvlačenja su: [9]

1. *Očvrstnuće kristalima mješancima*

Zapreke su rastvoreni strani atomi u rešetki željeza čineći intersticijske ili supstitucijske kristale mješance. Na porast čvrstoće najjače djeluje povišenje masenog udjela ugljika u čeliku, ali time opadaju svojstva duktilnosti. Povoljno djeluje i dušik. Od svih načina očvrstnuća ovaj daje najmanje efekte.

2. *Očvrstnuće martenzitnom transformacijom*

Kaljenjem dolazi do preklopne pretvorbe (deformacije) austenita u martenzit čime se povisuje tvrdoća i čvrstoća, ali pada istezljivost i žilavost pa je nužno dodatno provesti popuštanje.

3. *Očvrstnuće hladnom deformacijom*

Što je viši stupanj deformacije to će biti viša granica razvlačenja zbog toga što raste gustoća dislokacija. Žilavost se znatno smanjuje.

4. *Očvrstnuće granicama zrna, odnosno usitnjenjem zrna*

Zapreke gibanju dislokacija čine velikokutne granice zrna. Što je sitnije zrno, to je povoljnije. Usitnjenjem zrna dolazi i do povišenja žilavosti. Usitnjenje zrna se obično kombinira s ostalim načinima očvrstnuća.

5. *Očvrstnuće izlučivanjem (precipitacijom) ili disperzijom faza*

Radi se o izdvojenim fazama nelegiranih ili legiranih karbida ili ostalih prikladnih intermetalnih spojeva i prijelaznih faza iz homogene mikrostrukture ferita, austenita ili martenzita. Ove faze nastaju kada se prekorači granica topljivosti stranih atoma u rešetki željeza. Djelovanje tih faza ogleda se kroz njihovu raspodjelu i vrstu – koherentne ili nekoherentne, srednji promjer i njihov međusobni razmak. Koherentne faze mogu presjecati klizne ravnine za što se troši energija pri djelovanju vanjskog opterećenja. Druga je mogućnost da dislokacije zaobilaze faze za što opet treba energija, koja bi se inače utrošila u deformaciju.

Čelici povišene i visoke čvrstoće dijele se u sljedeće skupine:

- sitnozrnati normalizirani s feritno-perlitnom mikrostrukturom;  $360 < R_{p0,2} < 500 \text{ N/mm}^2$ ;
- poboljšani s mikrostrukturom popušenog martenzita;  $R_{p0,2} < 500 \text{ N/mm}^2$ ;
- termomehanički obrađeni,  $R_{p0,2} > 500 \text{ N/mm}^2$ .

### **2.7.1. Način proizvodnje čelika povišene čvrstoće**

Čistoća čelika i optimalni kemijski sastav su od velike važnosti za ispunjavanje zahtjeva koji se postavljaju na cjevovode. Što se tiče čistoće, postavljaju se zahtjevi za što manjim udjelom sumpora kako bi se osigurala veća lomna čvrstoća čelika i izbjegavanje uključaka aluminijevog oksida u blizini zavarenog spoja. Vrlo je bitno, pri proizvodnji voditi računa o što nižem udjelu nečistoća u čeliku.

### **2.7.2. Proces kontroliranog termomehaničkog valjanja čelika u obliku trake**

Glavna linija proizvodnje traka čelika za cjevovode je postupak kontroliranog termomehaničkog valjanja koji je najučinkovitiji kada se primjenjuje na mikro legirane čelike koji imaju povišenu temperaturu rekristalizacije. Međutim, postupak termomehaničkog valjanja podijeljen je u nekoliko koraka koji su zaslužni za konačna svojstva materijala.

#### **2.7.2.1. Predgrijavanje**

Od velike važnosti je temperatura predgrijavanja i prisutnost nerastvorenih čestica karbida: cilj predgrijavanja je postizanje jednolike raspodjele topline po pločama lima i potpuno rastvaranje mikro legiranih karbida i nitrida (Nb, V) (C, N). Tanke ploče griju se jednoliko u visokim pećima. Iznos temperature predgrijavanja ovisi o sastavu mikro legiranih elemenata u čeliku. Za čelike povišene čvrstoće s udjelom niobija, temperaturni raspon temperature predgrijavanja iznosi od 1150 do 1250 °C. TiN čestice ostati će nerastvorene na tim temperaturama.

#### **2.7.2.2. Grubo termomehaničko valjanje**

Cilj grubog termomehaničkog valjanja je postizanje najfinije moguće austenitne strukture prije postizanja temperature rekristalizacije. Iznad A<sub>3</sub>, odvija se rekristalizacija i očvršćivanje zrna. Faza grubog termomehaničkog valjanja završava iznad temperature ne-rekristalizacije, koja iznosi oko 1030 °C za čelike X60 i X80. U tu svrhu su primijenjeni specijalno razvijene redukcijske metode s TiN česticama koje sprječavaju rast rekristaliziranog austenitnog zrna. Za većinu čelika za cjevovode temperatura grubog termomehaničkog valjanja iznosi od 1200 do 950°C.

### **2.7.2.3. Završno termomehaničko valjanje**

Svrha ove faze proizvodnje je akumulacija naprezanja pri valjanju u zoni ne-rekristalizacije austenitnog zrna (ispod  $A_3$ ) kako bi nastala feritna struktura. Kontroliranim postupkom termomehaničkog valjanja može se dobiti vrlo fina (sitno-zrnata) feritna struktura. Postupak završnog termomehaničkog valjanja odvija se u zoni ne-rekristalizacije austenita (ispod temperature  $A_3$ ) u nižem temperaturnom intervalu iznad  $A_{r3}$  temperature (npr.  $T_{nr} > T > A_{r3}$ ). U toj zoni dolazi do precipitacije NbN uslijed smanjene otopivosti Nb u austenitu. Austenitno zrno se izdužuje. Početna temperatura za postupak kontroliranog termomehaničkog valjanja iznosi od 1050 do 950 °C i završava na temperaturi od 730 do 1000 °C, što uvelike ovisi o kemijskom sastavu, tj. udjelu mikro elemenata i uvjetima proizvodnje.

### **2.7.2.4. Snažna redukcija debljine lima**

Snažna redukcija (60 do 85%) za vrijeme kontroliranog procesa termomehaničkog valjanja povećava granicu razvlačenja bez nepovoljnog djelovanja na tranzicijsku temperaturu stanja žilavo – krhko, prema Charpy-u. Snažna redukcija rezultira usitnjavanjem zrna.

### **2.7.2.5. Režim hlađenja**

Režim hlađenja vrlo je bitan s aspekta postizanja optimalne čvrstoće uslijed kontroliranja učinka promjene mikrostrukture, usitnjavanja feritnog zrna i precipitacijskog očvršćivanja. Brzo hlađenje utječe na povećanje volumena bainita ili M/A strukture ili igličastog ferita.

### **2.7.2.6. Temperatura namatanja**

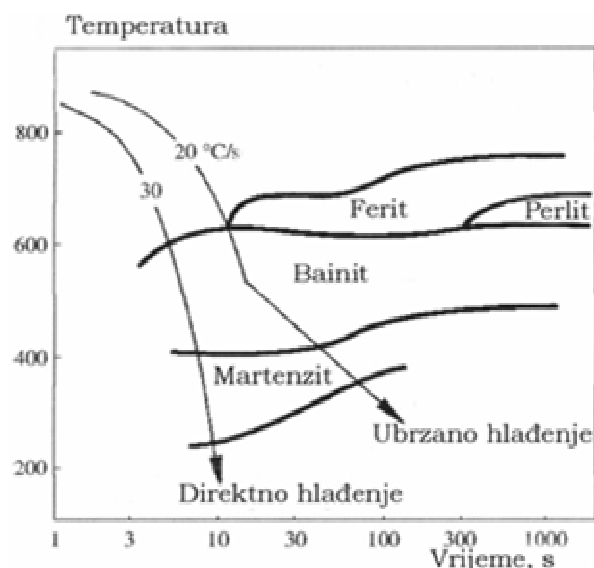
U ovoj fazi ne dolazi do promjene strukture materijala, ali ona je vrlo bitna za precipitacijsko očvršćivanje, stoga je potrebno strogo kontrolirati iznos temperature da bi se postigla najveće precipitacijsko očvršćivanje. TiC, NbC i V(C, N) precipitiraju u feritu za vrijeme hlađenja. Temperatura bi trebala biti što niža za fino očvršćivanje karbida i nitrida u feritu, međutim ne smije biti ni preniska kako se ne bi smanjio udio TiC zbog prespore difuzije. Ukoliko je temperatura namatanja preniska, precipitacija je oslabljena što krajnje rezultira niskim iznosom čvrstoće materijala.

### 2.7.3. Oblikovanje cijevi i postupak zavarivanja

Postupak izrade cijevi izvode se hladnim oblikovanjem ili hladnom ekspanzijom. Cijevi se mogu zavariti na dva načina, spiralno i longitudinalno. U današnje se vrijeme više primjenjuje postupak longitudinalnog zavarivanja cijevi zbog povećane kvalitete ploča lima koje služe za proizvodnju cijevi.

Zadnji korak kod proizvodnje cijevi je odabir postupka i tehnologije zavarivanja. Ovaj korak je vrlo složen i zahtijeva posebne analize kako bi se odabrao pravilan postupak, koji će zadovoljiti proizvodnost i troškove. Na raspolaganju stoji nekoliko elektrolučnih postupaka zavarivanja, poput EPP-a, MAG-a, TIG-a ali osim elektrolučnih, u posljednje vrijeme koriste se i elektrootporni postupci zavarivanja itd.

Čelik X70 proizvodi se termomehaničkim valjanjem uz hlađenje na zraku. Da bi se osigurala određena granica čvrstoće, kao mikrolegirni element, osim niobija, dodaje se vanadij. Ubrzanim hlađenjem, nakon postupka termomehaničkog valjanja, dobije se fina struktura kod čelika koji sadrži određenu količinu bainita. Bainit postaje glavna strukturna komponenta u čelicima klase X70. Čak i ako nema vanadija kao mikrolegiranog elementa, čelik s takvom strukturom zadovoljava zahtjeve na čvrstoću klase X70 čelika. Postoje dva načina na koji načina očuvati bainitnu mikrostrukturu: povećanjem količine legirnih elemenata ili brzine hlađenja dvije ploče. Drugi način zahtijeva dodatnu opremu, ali je ekonomski isplativ i ne utječe na zavarljivost materijala. Uobičajena brzina hlađenja iznosi oko  $15^{\circ}\text{C/s}$  za debljinu radnog komada od 20mm. Moguća je i kombinacija spomenutih metoda, ovisno o režimu hlađenja koji se može ostvariti postojećom opremom. Da bi se održala čvrstoća čelika X80, mikrostruktura mora imati 50% ferita i 50% bainita. Čelik klase X100 mora imati 100% bainitnu strukturu. Slika 2.7.1 prikazuje TTT dijagram za garantiranu bainitnu strukturu u čeliku X100, dobivenu uobičajenim postupkom hlađenja. [23,16]



Slika 2.7.1 TTT dijagram čelika X100 [23]

(kemijskog sastava 0.06% C; 1.80% Mn; 0.30% Mo; 0.20% Ni; 0.06% Nb)

Bainitna struktura može u sebi sadržavati martenzitne nakupine, što čini krhku fazu ukoliko je velik udio ugljika i ukoliko je sastavljena od netemperiranog martenzita. Garantirano dobra svojstva po pitanju čvrstoće u čeliku daje kemijski sastav s manje od 0.06% ugljika.

#### 2.7.4. Osobine i svojstva čelika za cijevi

Odlična zavarljivost kao i dobra mehanička svojstva čelika X70 prema API 5L, rezultat su napretka u području metalurgije i termomehaničke obrade. Za dobivanje zadovoljavajućih mehaničkih svojstava u zavarenom spoju, potrebno je razumijeti sastav niskougljičnog čelika (ispod 0,1%), te mikrolegirane sa Nb, Al ili V, a sastav treba staviti u kontekst parametara toplinske, odnosno toplinskomehaničke obrade sa ciljem postizanja sitnozrnate strukture.

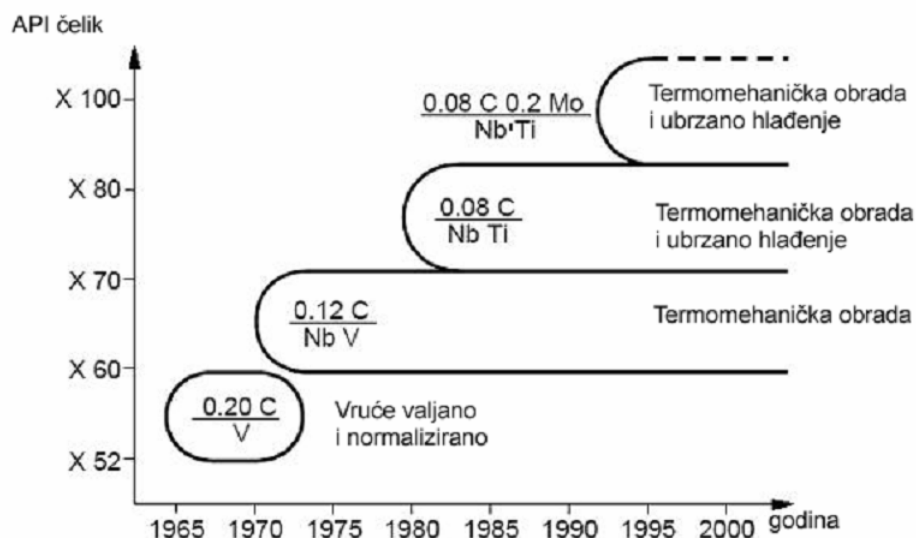
Čelik X70 svakodnevno se koristi u izgradnji cjevovoda i u manjoj mjeri za off-shore postrojenja. Kako govorimo o cjevovodima koji su u eksploataciji pod vodom, i još k tome na izvjesnim dubinama; na čelik X70 utječe hidrostatski tlak u puno većoj mjeri nego li operativni tlak. Tako da je stroži uvjet utjecaj na cjevovod izvana i time se zadaju zahtjevi proizvođaču u vidu kvalitete geometrijskih oblika, kako ne bi došlo do otkaza prilikom eksploatacije. Problemi poput povećanja nečistoća u plinu ( $H_2S$ , voda), uvjetuju navarivanje osnovnog materijala slojem visokolegiranog čelika sa ciljem izbjegavanja pukotina uzrokovanih vodikom, odnosno korozivnih učinaka vode (kloridi). [23,16]



**Slika 2.7.2 Cijevi raznih promjera i tipova (X70, X90, X100) [45]**

U zadnjih 30-tak godina uvelike su povećani zahtjevi na materijale (cjevovode) za transport plina i nafte. Za većinu današnjih eksploatacijskih zahtjeva koriste se čelici X70 i X80 po API 5L, a X90 i X100 tek se uvode u primjenu. Cjevovodi velikih promjera transportiraju i do 75% svjetske proizvodnje prirodnog plina i to na najekonomičniji i najsigurniji način. Crpilišta nafte i plina sele se u dublje vode, tako da cjevovod kao takav ima sve veće zahtjeve. Stoga se i može vidjeti iz grafa kronološki razvoj čelika za cijevi. Sedamdesetih godina cijevi su bile vruće valjanje, a zatim normalizirane. To je zamijenjeno sa termomehaničkim valjanjem i mikrolegiranjem Nb i V, te uz smanjeni udio C (do 0,12%) postigle su se gradacije čelika X70. unapređenjem tehnologije (mikrolegiranjem i termomehaničkom obradom uz ubrzano hlađenje) dobiveni su čelici klase X80, a i dalje su zadržana svojstva dobre zavarljivosti. Proizvodnja od 8 milijuna tona po godini, uglavnom cijevi X70 i X80, govori da je potrebno i dalje razvijati tehnologiju zavarivanja i održavanja u eksploataciji. [23,16]

Kao što smo već ranije napomenuli, mehanička svojstva čelika definirana su mikrostrukturnim značajkama: granice zrna, precipitati i dislokacije. Mehanizmi očvrnuća kod niskolegiranih čelika napreduju sa razvojem prilikom transformacije iz austenita pri hlađenju, a utječe se brzinom hlađenja i završnom temperaturom hlađenja.

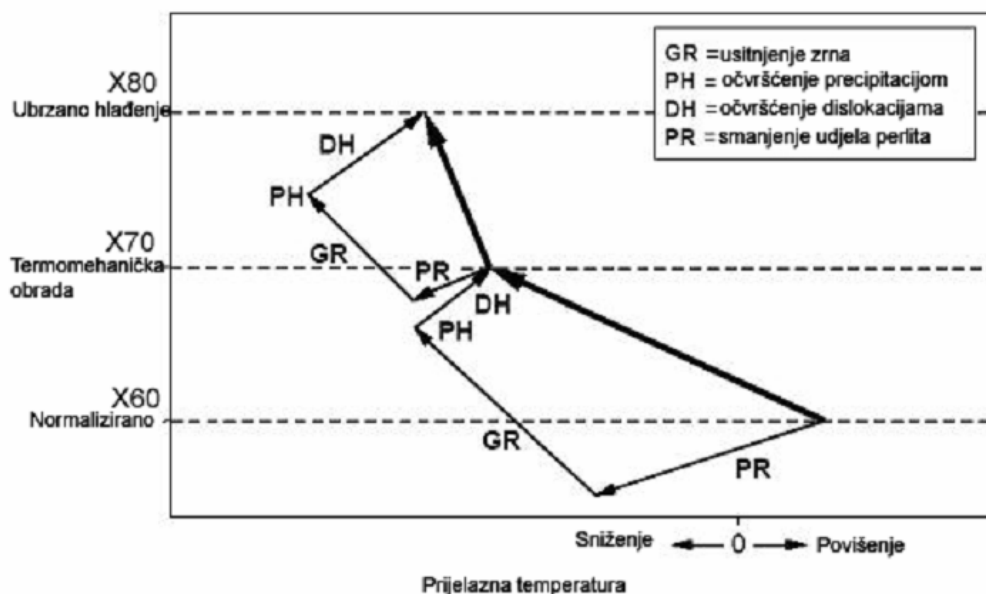


**Slika 2.7.3 Grafički prikaz kronološkog razvoja čelika za cijevi [16]**

Slikom 2.7.4 je opisan napredak metalurgije kroz godine, odnosno prikazan je kako se događao razvoj očvršnuća od X60, X70 do X80. čelici X60 (rane sedamdesete) su normalizirani i obično sadrže: 0.2% C, 1.55% Mn, 0.12% V, 0.03% Nb i 0.02 N. Kod čelika X70 udio ugljika iznosi 0,12% i manje, a još je primjenjena termomehnička obrada što je dovelo do smanjenja feritnog zrna (povećeva se čvrstoća i snižava prijelazna temperatura). Gubitak čvrstoće je nastao smanjenjem udjela perlita nadomješten je precipitacijskim očvršćenjem i dislokacijama, dok je bez obzira na strukturne promjene zadržana dobra zavarljivost i prihvatljive prijelazne temperature iz žilavog u krhko stanje.

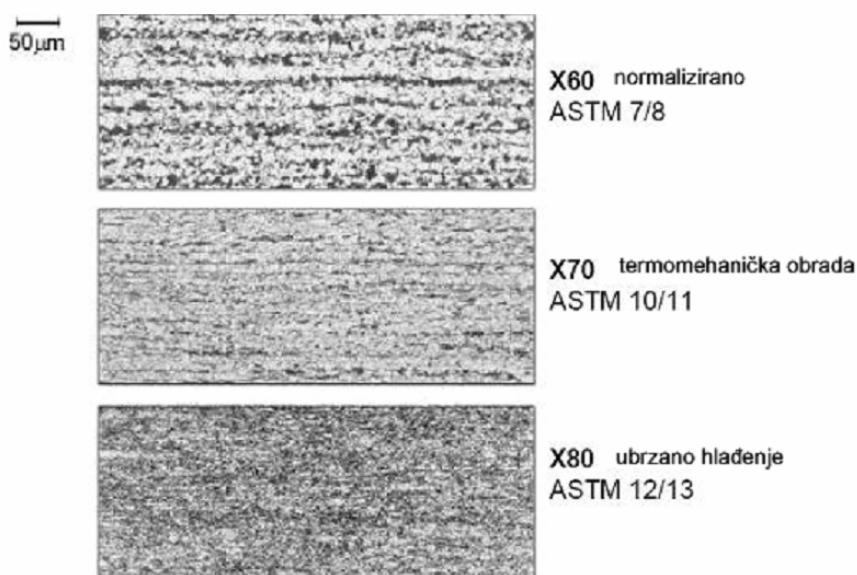
Nadalje, razvoj prema gradaciji čelika X80 dobilo se promjenom feritno-perlitne strukture u feritno-bainitnu, smanjenjem udijela % C, usitnjenjem zrna te povećanjem gustoća dislokacija.





**Slika 2.7.4** Mehanizmi očvršćavanja za čelike X60, X70 i X80 [16]

Čelik X60 ima normaliziranu trakastu feritno-perlitnu strukturu veličine zrna po ASTM 7/8, struktura čelika X70 je ujednačenija a zrno veličine po ASTM 10/11, dok čelik X80 ima feritno-bainitnu strukturu veličine zrna po ASTM 12/13.



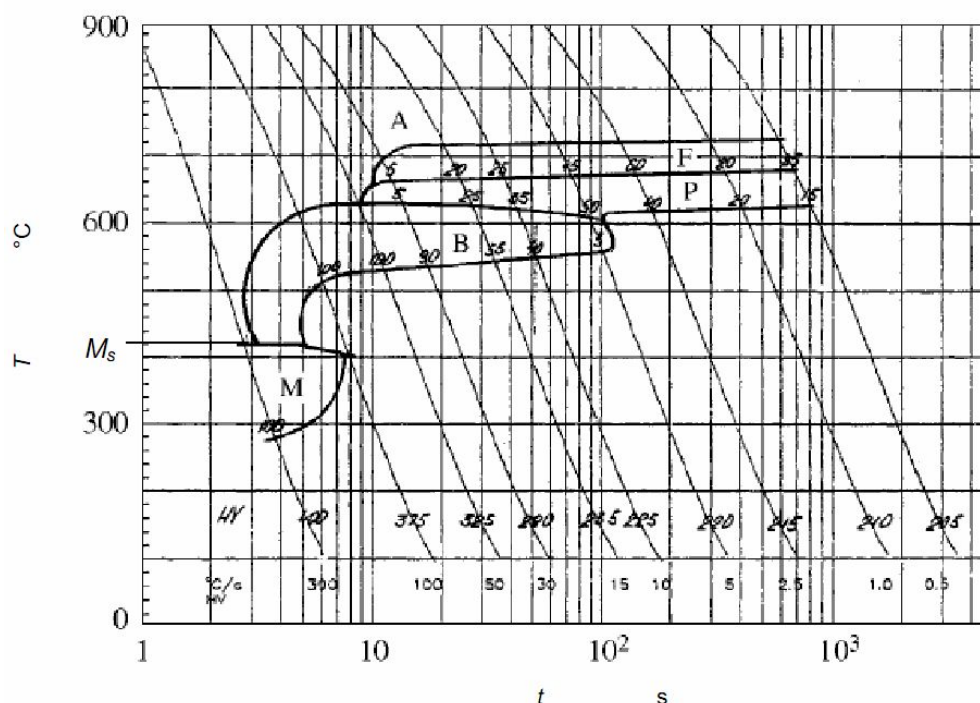
**Slika 2.7.5** Mikrostrukture čelika X60, X70 i X80; usporedba veličine zrna [23]

Kod termomehanički valjanih čelika utjecaj mikrolegirajućih elemenata se očituje u sklonosti vezivanju sa dušikom i ugljikom. Važno je razumjeti mehanizme vezivanja jer se kroz taj proces događa razvoj mikrolegiranih čelika. Tako, niža temperatura završnog valjanja dovodi do

znatnog smanjenja broja i veličine precipitiranih karbonitrida, što se ne može reći za titanove karbonitride gdje nije ustanovljen utjecaj završne temperature valjanja.. temperatura rastvaranja karbida se znatno snizuje zbog prisustva zaostalog dušika. Kod ponovnog zagrijavanja pri valjanju određena količina Nb se rastvori za razliku od stabilnih Ti nitrida. Pri termomehaničkom valjanju u području donjeg austenita dolazi do stvaranja finih čestica Nb precipitata što rezultira sitnijim austenitnim zrnom, a što pridonosi čvršćoj feritnoj strukturi.

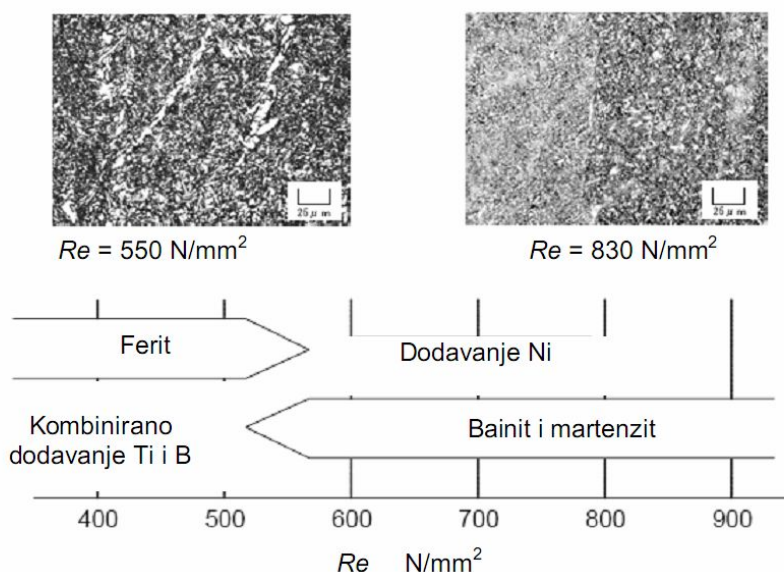
Sa stajališta zavarivanja, interesantno je sagledati problem utjecaja miješanja dodatnog materijala na prvotnu strukturu osnovnog materijala. Pravilno odabranim parametara i dodatnog materijala, cilj nam je postići optimum, odnosno maksimum kvalitete zavarenog spoja.

Za REL uobičajene brzine hlađenja od 20...70 °C/s ili za sporije hlađenje kod EPP-a od 7...13 °C/s iz TTT dijagrama je vidljiva dobivena struktura zavarenog spoja, a ta je: ferit, perlit i bainit. Pri brzinama hlađenja većim od 70°C/s i više, koje su prisutne u mokrom, podvodnom zavarivanju, pojavljuje se martenzitna struktura sa tvrdoćama višim od 350HV10 što je osjetljivo područje za pojavu vodikovih pukotina. Stvaranje martenzita počinje na približno 420°C iz čega slijedi da jedini način izbjegavanja pojave hladnih pukotina je definiranje točnih parametara i tehnologije zavarivanja, jer je vrlo usko područje za garanciju homogene strukture.



Slika 2.7.6 TTT dijagram čelika X70 za različite krivulje hlađenja [24]

Na slici 2.7.8 je prikazan TTT dijagram za čelik X70 s različitim krivuljama hlađenja, kod hlađenja u intervalu od 7 do 13°C/s (postupak elektrolučnog zavarivanja pod zaštitom praška) i 20 do 70 °C/s (ručni postupak elektrolučnog zavarivanja) nastaje struktura koja u sebi ima ferita, perlita i bainita. Martenzitna struktura koja u kombinaciji s naprezanjima i udjelom vodika uzrokuje nastanak hladnih pukotina, nastupa kod režima hlađenja od 100 °C/s nakon zavarivanja, za čelik X70. Temperature na kojima se odvija nastanak martenzita, za čelik X70, iznosi oko 420 °C. Iznos tvrdoće čelika X70 do 350 HV10 garantira nepostojanje hladnih pukotina i odgovara režimu hlađenja od 70 °C/s i više, a pojavljuju se pri podvodnom zavarivanju. Struktura materijala u ZUT-u kod čelika X70 nije jednolika, što utječe na udarnu udarnu žilavost. [23,16]



**Slika 2.7.7 Metode legiranja za povećanje čvrstoće metala zavara [16]**

Kako se razvijaju čelici povišene i visoke čvrstoće paralelno prati se i razvoj dodatnih materijala za zavarivanje, pri čemu za cjevovode i offshore postrojenja, zbog hladnoće i dinamičkih opterećenja traže se visoke vrijednosti udarne radnje loma, niske prijelazne temperature i dovoljna vlačna čvrstoća. Glavni mehanizmi dobivanja željenih mehaničkih svojstava su smanjenje udjela kisika, te mikrolegiranje s B, Ti, Ni. U razvoju dodatnih materijala najbolja svojstva se dobivaju primjenom praškom punjenih žica jer je moguće izvesti mikrolegiranje iz praška. Podvodna postrojenja sve su više na većim dubinama koja su sama po sebi hladnija, a zahtjevi na čvrstoću i udarnu radnju loma također rastu, pri čemu se moraju nužno zadovoljiti uvjeti dobre zavarljivosti. Zavarljivost ovakvih čelika vrlo je dobra kad se vrši na suhom, ali podvodno, često reparaturno ili montažno zavarivanje vrlo je zahtjevno zbog jakog odvođenja topline, odnosno ubrzanog hlađenja, te stvaranja neželjenih krhkih mikrostruktura koje su leglo za stvaranje i razvoj pukotina. Zato je važno raditi na razvoju tehnologija i dodatnih materijala.

## 2.8. Zavarljivost čelika povišene čvrstoće

*Temeljni problem kod čelika povišene čvrstoće predstavlja zavarljivost.*

Premalim unosom topline dobije se povećana čvrstoća i tvrdoća zavarenog spoja, što uz krutostkonstrukcije i prisutnost vodika u zavaru može uzrokovati nastajanje pukotina, smanjuje se deformabilnost i povećava sklonost ka krhkom lomu. Preveliki unos topline može uzrokovati tople pukotine različitog karaktera, te osjetljivost na početak i širenje krhkog loma duž zone staljivanja pri niskim temperaturama. Iz toga proizlazi zaključak da razmatranja o poboljšanim čelicima treba zasnivati na kriteriju pojave pukotina, a unesena energija prije i u tijeku zavarivanja mora biti točno definirana i kontrolirana. [17]

Standardom ISO određena je zavarljivost na sljedeći način [17]:

Metalni materijal smatra se zavarljivim ako se može postići homogenost zavarenog spoja primjenom pogodnog postupka zavarivanja, tako da spojevi odgovaraju zahtjevima njihovih lokalnih svojstava i utjecaja na konstrukciju, čiji su oni sastavni dio, te ako je konstrukcija nakon zavarivanja dovoljno pouzdana.

Za ocjenu zavarljivosti čelika povišene čvrstoće provode se brojna ispitivanja, kao što su:

- nastajanje hladnih pukotina
- nastajanje toplih pukotina
- lamelarno trganje
- krhki lom
- povišenje tvrdoće materijala
- starenje materijala
- nastajanje pukotina u visokočvrstom materijalu

Prilikom zavarivanja visokočvrstih čelika na prvom mjestu javlja se problem pojave pukotine.

Pukotine se mogu podijeliti na one u:

- metalu zavora
- osnovnom materijalu, koje nastaju u zoni utjecaja topline ili u osnovnom materijalu često ove pukotine prelaze jedna u drugu.

Najznačajniji metalurški uzroci nastajanja pukotina u metalu zavara:

- prevelika brzina hlađenja zavarenog spoja
- strukturne transformacije u zavarenom spoju (nastajanje krhkih struktura)

Najznačajniji metalurški uzroci nastajanja pukotina u osnovnom materijalu:

- kemijski sastav materijala
- prisutnost vodika
- nastajanje unutrašnjih naprezanja zbog temperaturnog ciklusa pri zavarivanju

Opći uzroci nastajanja pukotina u metalu zavara su loš izbor materijala (osnovnog i dodatnog), loše izvođenje zavarivačkih radova i slično. Osim općih uzroka utječu i greške u materijalu, prisutnost zaostalih naprezanja nakon valjanja ili oblikovanja i slično.

Sklonost nastajanja pukotina može se smanjiti [17]:

- upotrebom dodatnog materijala s niskim sadržajem vodika (vodik u zavarenom spoju izaziva krhkost materijala)
- upotrebom austenitnog dodatnog materijala zbog veće rastvorljivosti vodika u austenitnom materijalu i zbog veće istezljivosti materijala s austenitnom strukturom
- predgrijavanjem, koje u slučaju visokočvrstih poboljšanih čelika tretirati kao parametar koji povećava ili smanjuje unesenu energiju, kako bi se vrijeme hlađenja ( $t_{8/5}$ ) držalo u preporučljivim granicama

Za eksploataciju su općenito važna sljedeća svojstva [17]:

- što viša udarna radnja loma (KV)
- što niža prijelazna temperatura ( $T_{p,rel}$ ), što oboje ukazuje na potrebe otpornosti na hladni krhki lom
- visoka dinamička izdržljivost ( $R_d$ ) i niska zarezna osjetljivost
- sposobnost da jednom nastala pukotina bude zaustavljena u materijalu ( $K_c$ )
- visoka otpornost na trošenje
- visoka otpornost na koroziju

Pogreške homogenosti prema obliku dijelimo na ***plosnate i prostorne***. [17]

***Plosnate*** greške homogenosti dijelimo na:

a) *pukotine*

- mikro pukotine – ispod 0.3 mm
- makro pukotine

b) *greške vezivanja*

- hladno naljepljivanje – najčešće se javlja kod zavarivanja odozgo prema dolje i ne može se otkriti prozračivanjem, već samo ultrazvukom

***Prostorne*** greške homogenosti dijelimo na:

a) *pore* – najčešće kod MIG zavarivanja aluminija

b) *uključine*

- troska (kod MIG zavarivanja kratkim spojevima mogu biti i komadići elektrode)
- različiti spojevi loših mehaničkih svojstava

**Vrste pukotina** [17]:

- *Vruće pukotine*

Nastaju kod pojave lako taljivih faza (800-500 °C) i dolazi do segregacije metala avara. Nastaju na temperaturi oko 800 °C kod skrućivanja čelika. Razlog je različita temperatura i deformabilnost pojedinih dijelova zavara, što može uzrokovati Segregaciju metala zavara. Takve pukotine mogu nastati i među kemijski različitim područjima. Spriječavanje je moguće manjim unosima topline i povećanjem brzine hlađenja.

- *Hladne pukotine*

Najčešći je uzrok prisutnost vodika. Nastaju na temperaturama manjim od 300 °C, a podjednako nastaju u ZUT-u i u metalu zavara.

Uzroci su: visoke vršne temperature i porast zrna u ZUT-u, visoki sadržaj vodika, visoki sadržaj martenzita (pomak  $M_s$  i  $M_f$  krivulja prema višim temperaturama), velika brzina hlađenja, zaostala naprezanja. Spriječavanje nastajanja hladnih pukotina je moguće kroz: smanjivanje krutosti konstrukcije (teško ostvarivo), smanjivanje sadržaja vodika (teško ostvarivo), omogućenje bolje difuzije vodika – postiže se većim unosom topline i sporijim hlađenjem, smanjivanjem brzine hlađenja – to se može postići predgrijavanjem konstrukcije.

- *Pukotine uslijed žarenja*

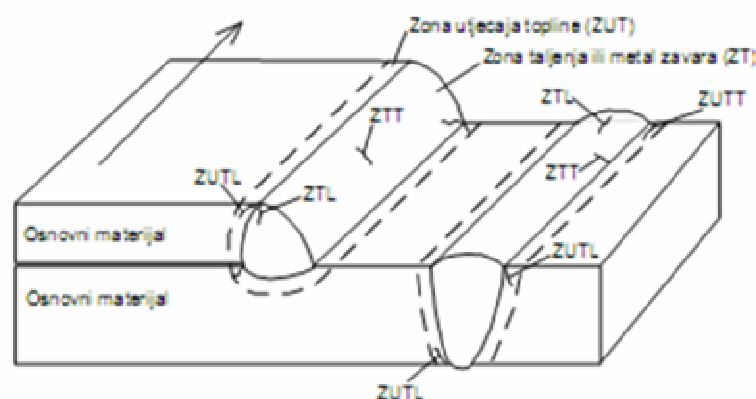
- *Lamelarne pukotine*

Nastaju uslijed loših svojstava materijala i kod naprezanja u smjeru normale (posebno se vrši kontrola sklonosti lamelarnim pukotinama konstrukcija na hladnom)

### 2.8.1. Hladne pukotine

Hladne pukotine su pogreške koje se mogu pojaviti u zavarenom spoju pri hlađenju metala zavora na temperaturi bliskoj sobnoj ili povišenoj, ali ne višoj od 200 do 250°C.

Mogu se pojaviti čak i nekoliko dana nakon zavarivanja pa se takve pukotine nazivaju "zakašnjele hladne pukotine". Zbog mogućnosti nastajanja zakašnjele hladne pukotine, a poučeni iskustvom iz prakse, ispitivanja zavarenih spojeva metodama bez razaranja (prije svega ultrazvukom i magnetnom metodom, penetrantima i ostalim metodama) provode se 48 sati nakon završetka zavarivanja. [18]



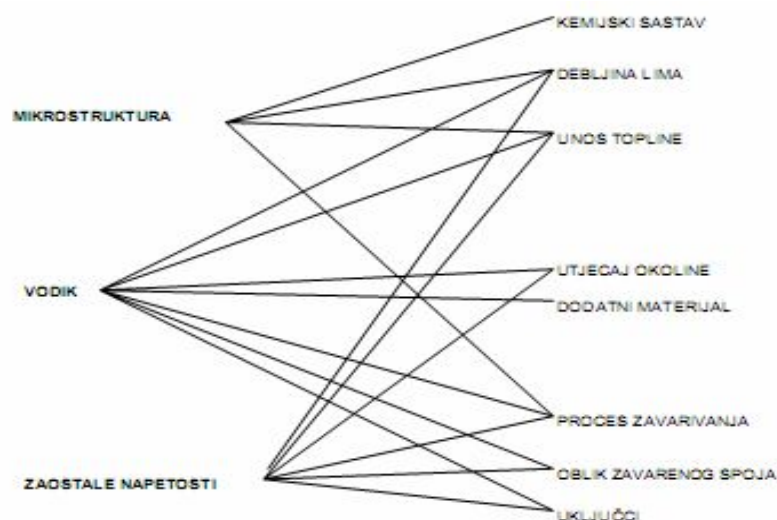
**Slika 2.8.1 Klasifikacija, lokacija i orijentacija hladnih pukotina sukladno IIW-u [18]**

Hladne pukotine mogu nastati bilo u zoni utjecaja topline (ZUT) ili u metalu zavora (MZ), odnosno i u zoni utjecaja topline i u metalu zavora. S obzirom na orijentaciju, mogu biti približno usporedne s uzdužnom osi zavarenog spoja (longitudinalne), okomite (transverzalne) na uzdužnu os zavarenog spoja ili se mogu pojaviti bilo pod kojim kutom, s obzirom na uzdužnu os zavarenog spoja.

Ako hladne pukotine nisu otkrivene pri kontroli nakon zavarivanja, odnosno zavareni spojevi nisu popravljeni, pukotine će se dalje širiti, pa mogu dovesti do zakazivanja zavarenog spoja već tijekom izrade, a vrlo vjerojatno tijekom eksploatacije.

Do nastanka hladnih pukotina dolazi istodobnim djelovanjem sljedećih čimbenika [18]:

1. postojanja neravnotežnih struktura u zavarenome spoju, što je karakteristično za čelike sklone zakaljivanju, [19] sklonost materijala prema zakaljivanju (to se može utvrditi indirektnim metodama ispitivanja zavarljivosti, npr. HV, eksperimentalnim istraživanjima).
2. ako je u zavarenome spoju tijekom zavarivanja postojao vodik koji nakon zavarivanja nije izašao vani
3. izražene napetosti konstrukcije (visoka vanjska i unutarnja naprezanja, kao i visoka krutost, odnosno debljina osnovnog materijala...)



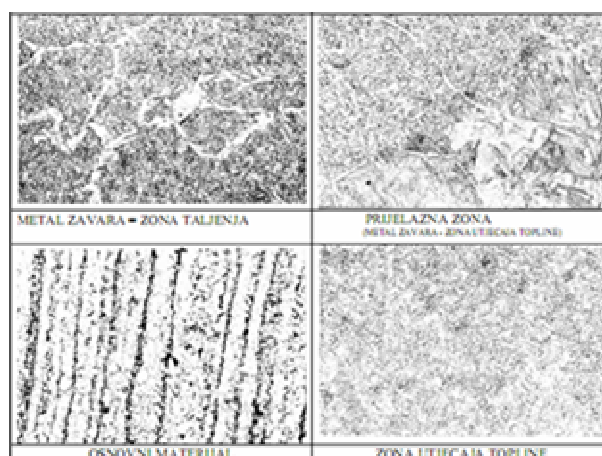
**Slika 2.8.2 Utjecajni čimbenici nastanka hladnih pukotina [18]**

Hladne pukotine neće se pojaviti, ako nisu ispunjena sva tri prethodna preduvjeta nastanka, ali bitno je naglasiti da se one češće pojavljuju (iniciraju) u ZUT-u a rjeđe u samom metalu zavara. Ukoliko je nakon zavarivanja utvrđena prisutnost pukotina, postoji više načina da se razluče hladne od toplih pukotina. Razlikuju se od toplih u prvom redu time što su manje razgranate i manje otvorene. Ako se radi o otvorenim pukotinama, s pristupom zraka, onda su to tople pukotine tamnije boje zbog površinske oksidacije na visokim temperaturama pri kojima nastaju tople pukotine. Kod hladnih je pukotina prijelomna površina svjetlija, naime debljina oksidnog sloja, za razliku od toplih, vrlo je mala. [18]



### 2.8.1.1. Utjecaj strukture na nastanak hladnih pukotina

Pod utjecajem zavarivačkog toplinskog ciklusa pri zavarivanju čelika, zavar i zona utjecaja topline prolaze određene strukturne pretvorbe. Pri tome se kod općih konstrukcijskih čelika dio osnovnog metala u zoni utjecaja topline austenitizira, a pri hlađenju austenit se pretvara u neku od struktura, ovisno u prvom redu o brzini hlađenja, kemijskom sastavu osnovnog materijala, ali i ostalim čimbenicima procesa zavarivanja. [18]



**Slika 2.8.3 Mikrostruktura nastala nakon zavarivanja [55]**

Kao posljedica prevelike brzine hlađenja, kod osnovnih materijala sklonijih zakaljivanju, nastat će tvrde strukture koje uz određenu razinu napetosti i sadržaja difuzijskog vodika pogoduju nastanku hladnih pukotina.

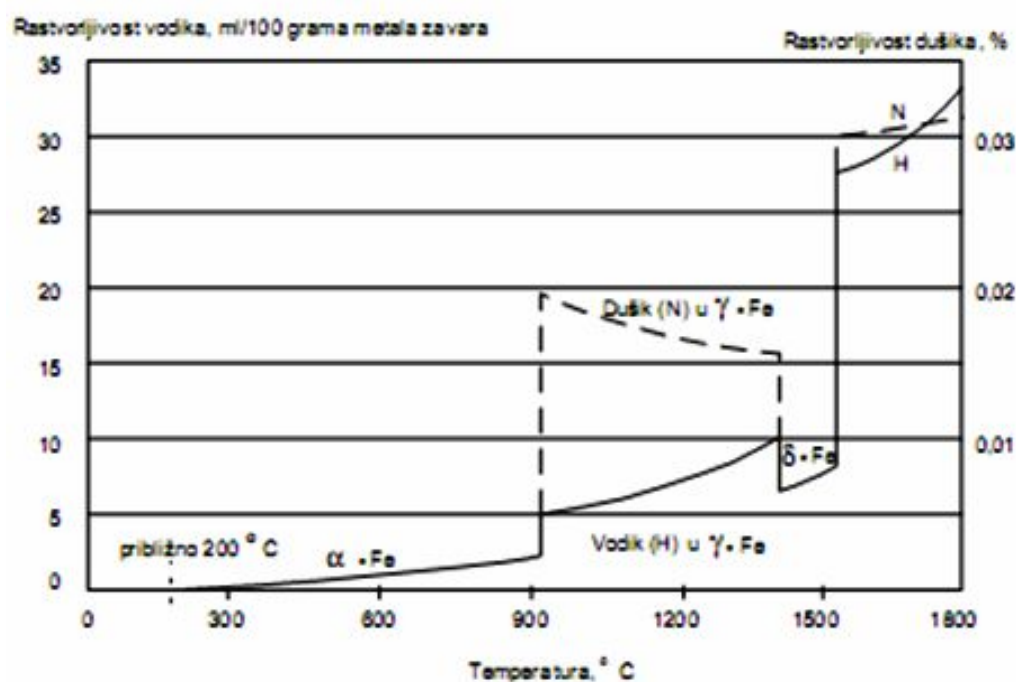
Karakteristika je zavarivačkog toplinskog ciklusa brzo ugrijavanje do temperature na kojoj nastupa zavarivanje i kratkotrajna austenizacija. Ako su poznate krivulje pretvorbe pri hlađenju za različite uvjete zavarivanja, može se utvrditi na koji će se način mijenjati strukture čelika tijekom zavarivanja.

### 2.8.1.2. Utjecaj difuzijskog vodika

Vodik nastaje prilikom disociranja vodene pare u električnom luku, a o procesu zavarivanja ovisi na koji će način vodena para doći u električni luk.

Pri zavarivanju elektrolučnim postupcima vodik može doći u zavareni spoj iz: [18]

- nedovoljno suhe obloge elektrode kod postupka REL ili nedovoljno suhog zaštitnog praška kod postupka EPP (vlažna obloga elektrode ili vlažan zaštitni prašak), što ima za posljedicu nastajanje vodene pare u atmosferi električnog luka pri zavarivanju
- neodstranjenih organskih tvari s rubova žlijeba za zavarivanje (masnoća, organski premazi i sl.)
- vlage s rubova žlijeba za zavarivanje (higroskopna ili vezana vlaga)
- vlage iz nedovoljno kvalitetnog zaštitnog plina (kod postupka zavarivanja MIG/MAG i TIG)
- vlage iz praška punjene žice kod postupka MAG (rjeđi, ali moguć slučaj, ako se praškom punjena žica nepravilno skladišti)
- vlažne okoline (pri zavarivanju bez predgrijavanja, uz preveliku relativnu vlažnost i vrlo nisku temperaturu)
- vlaga prilikom podvodnog mokrog zavarivanja (neposredna vodena okolina)



Slika 2.8.4 Rastvorljivost vodika u čeliku [55]

Treba naglasiti da rubovi žlijeba za zavarivanje, pokriveni korozijskim slojem, predstavljaju pojačan izvor vodika u metalu zavara.

### 2.8.2.3. Utjecaj naprezanja

Naprezanja koja se razmatraju pri istraživanju hladnih pukotina mogu se podijeliti u tri skupine, ovisno o uzrocima njihova nastanka: [18]

- izravna
- neizravna
- vanjska

Izravna naprezanja djeluju lokalno u blizini zavarenog spoja. Ona su posljedica brzog lokalnog zagrijavanja i hlađenja zavarenog spoja. Nastaju zbog postojanja temperaturnog gradijenta u materijalu koji se zavaruje, čemu se još dodaju i naprezanja zbog utjecaja strukturnih pretvorbi.

Neizravna naprezanja (ili naprezanja zbog ukrućenja) nastaju pri procesu zavarivanja zbog vanjskih ukrućenja. Njima se može do određenog stupnja upravljati u fazi konstruiranja.

Vanjska naprezanja su ona koja se javljaju tijekom izradbe i koja mogu djelovati na zavareni spoj tijekom zavarivanja., a uzrokovana su: težinom dijelova koji se spajaju, elastičnim vezama među dijelovima, iskrivljenjem zbog drugih nanesenih zavara u procesu hlađenja i dr.

### 2.8.3. Metode ispitivanja sklonosti hladnim pukotinama i postojeći modeli

U načelu, kvalitetan kriterij ispitivanja zavarljivosti bi morao omogućiti korisniku da odabere kombinaciju čelika, dodatnog materijala i postupka zavarivanja koji bi osigurali dovoljan stupanj sigurnosti od pojave vodikovih pukotina uz minimalan trošak. Uz to, ispitivanjem bi se morao razlučiti utjecaj svakog utjecajnog faktora koji može dovesti do pojave pukotine. Do sad je definiran cijeli niz empirijskih metoda ispitivanja materijala na sklonost pukotinama uslijed vodika koje se mogu svrstati u dvije kategorije: ispitivanja s vanjskim narinutim naprežanjem (npr. Implant, TRC-Tensile Restraint Cracking, LTP) ili ispitivanja s vlastitim zaostalim naprežanjima (npr. Tekken, CTS-Controlled Thermal Severity, WIC-Welding Institute of Canada, IRC-Instrumented Restraint Cracking, Lehigh Restraint Test, RGW test itd.). [16]

Metode ispitivanja sklonosti čelika prema nastanku hladnih pukotina pri zavarivanju možemo podijeliti također na izravne (direktne) i neizravne (indirektne). Izravne su metode one koje se provode na uzorcima zavarenih spojeva i/ili zavarenim spojevima na zavarenoj konstrukciji, dok se neizravne metode ispituju na različitim eksperimentalno dobivenim jednadžbama za procijenu utjecaja raznih čimbenika na pojavu pukotine. [17]

**Izravna ispitivanja** mogu se podijeliti u tri skupine:

1. ispitivanje sa stvarnim zavarivanjem uz vlastitu krutost (Tekken, Lehigh, CTS, probe s kružnim zarezom RD) i probe s prisilnom krutošću (s vanjskim dodatnim opterećenjem, npr. TRC, RRC i dr.)
2. ispitivanje s realnim ciklusom ili uloženim uzorkom (umetak ili implant)
3. ispitivanje simuliranjem ciklusa zavarivanja (npr. Ispitivanje na uređajima Gleeble, Thermorestor i Smitweld)

Kriterij ocjene sklonosti hladnim pukotinama može biti:

- a) kvalitativan (nakon istraživanja zavarljivosti donosi se zaključak da je materijal "sklon" ili "nije sklon" prema hladnim pukotinama)
- b) kvantitativan, ako se može numerički iskazati neku od relevantnih veličina (npr. Maksimalna naprežanja pri kojima ne dolazi do nastajanja hladnih pukotina kod metode implant)

**Neizravna ispitivanja** [19] koriste računske metode za ocjenu sklonosti čelika prema nastanku hladnih pukotina. Jedna od metoda je Ito-Bessyo:

$$P_w = P_{cm} + H/60 + K/(400\,000) \quad (2.3)$$

gdje je:

$$P_{cm} = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + (Mo + V)/15 + Ni/60 + 5 \cdot B \quad (2.4)$$

$$K = K_o \cdot d \quad (2.5)$$

$K_o$  je čimbenik intenziteta ukrućenja i iznosi 69 N/mm<sup>2</sup> za limove do 60 mm. Smatra se da je čelik sklon hladnim pukotinama ukoliko vrijednost parametara  $P_w > 0,24$ .

Sklonost sitnozrnatih čelika povišene i visoke čvrstoće prema hladnim pukotinama često se tumači s metalurškog gledišta. Ta sklonost često se izražava ugljikovim ekvivalentom koji se dobiva izračunavanjem po određenim formulama. Na osnovi djelovanja ugljika i ostalih kemijskih elemenata iz sastava čelika može se očekivati mikrostruktura zavarenog spoja kao funkcija brzine hlađenja nakon zavarivanja.

K ekvivalent ugljika može dovoljno kritički ocijeniti zavarljivost čelika, ali modifikacijom kemijskog sastava čelika (npr. razvojem novog čelika) potrebno je i modificirati formule za izračunavanje ekvivalenata ugljika kao pokazatelja zavarljivosti čelika. Prema Suzukiju formule  $C_{eq}(WES)$  i  $CE(IIW)$  odgovaraju za čelike sa sadržajem ugljika  $C \geq 0.18\%$  i vlačnom čvrstoćom od 400 do 700 N/mm<sup>2</sup>, dok je za čelike sa sadržajem  $C \leq 0.17\%$  i vlačnom čvrstoćom od 400 do 900 N/mm<sup>2</sup> predložena formula Ito-a i Bessy-a.

Tablicom, prikazane su formule za računanje ugljikovih ekvivalenata prema različitim autorima. U posljednjem stupcu dana je korekcija formule i rezultata pokusa pri kojima su se javljale pukotine.

**Tablica 2.1. Metode ispitivanja sklonosti hladnim pukotinama i postojeći modeli [17]**

Metoda	C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	B	Korel.
$C_{eq}$ (WES, JIS)	1	1/24	1/6	-	1/40	1/5	1/4	-	1/4	-	72,2%
CE (IIW)	1	-	1/6	1/15	1/15	1/5	1/5	-	1/5	-	78,1%
Graille	1	-	1/16	-	1/50	1/23	1/7	1/8	1/9	-	82,1%
Pn (Tanaka)	1	1/20	1/10	1/20	-	1/30	1/20	-	-	-	82,8%
Düren	1	1/25	1/16	1/16	1/60	1/20	1/40	-	1/15	-	84,0%
$P_{cm}$ (Ito)	1	1/30	1/20	1/20	1/60	1/20	1/15	-	1/10	5	84,9%
Stout	1	-	1/6	1/40	1/20	1/10	1/10	-	-	-	86,6%
CEN*	1	1/24	1/6	1/15	1/10	1/5	1/15	1/5	1/5	5	91,1%

\* potrebno je pomnožiti sa koeficijentom A(C)

Kombinacijom formula Pcm i CE proizašla je nova formula CEN koja pomnožena sa čimbenikom A(C) prilagođava djelovanje sadržaja ugljika.

$$CEN = C + A(C) \cdot [Si/24 + Mn/6 + Cu/15 + Ni/20 + (Cr + Mo + Nb + V)/5 + 5 \cdot B] \quad (2.6)$$

gdje se koeficijent A(C) računa po formuli:

$$A(C) = 0,75 + 0,25 \cdot \tanh[20 \cdot (C - 0,12)] \quad (2.7)$$

Za procjenu zavarljivosti vrlo često se koristi maksimalna tvrdoća koja se nakon zavarivanja može očekivati u ZUT-u.

Postoji više empirijskih formula za izračunavanje maksimalno očekivane vrijednosti tvrdoće u zavarenome spoju, uz uvažavanje odgovarajućih ograničenja (npr. sadržaj kemijskih elemenata).

Kao primjer navest će se neke češće korištene formule za izračunavanje maksimalno očekivane tvrdoće u zavarenom spoju. Za uobičajene nelegirane i niskolegirane čelike najveća tvrdoća u ZUT-u može se izračunati iz poznatog sadržaja kemijskih elemenata prema sljedećoj formuli:

$$HV_{\max} = 90 + 1050 \cdot C + 47 \cdot Si + 75 \cdot Mn + 30 \cdot Ni + 31 \cdot Cr \quad (2.8)$$

Pored te formule koristi se i formula Boothby – Cottrella:

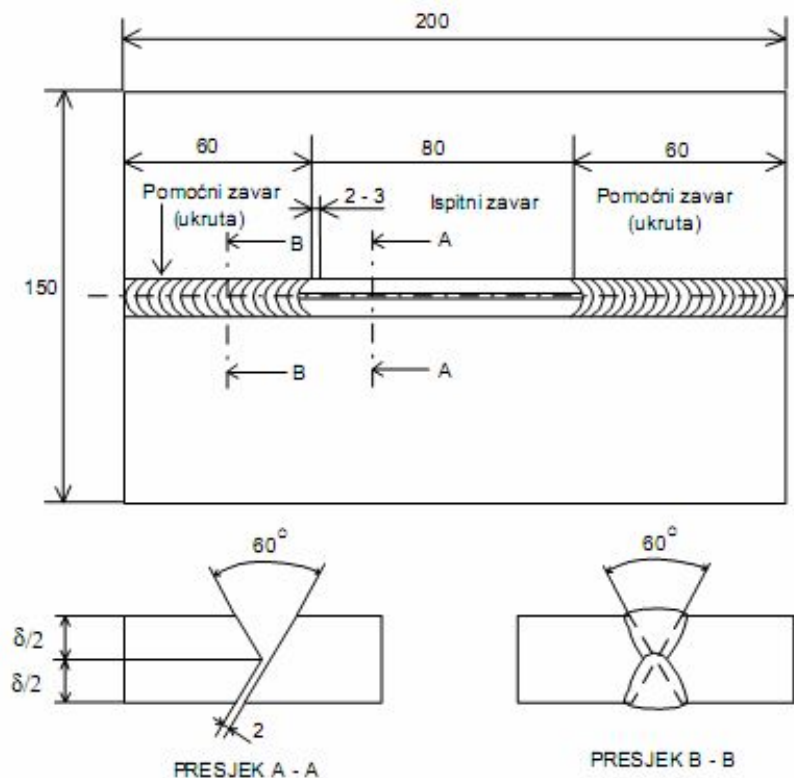
$$HV = 2019 \cdot [(1 - 0,5 \cdot \log t_{8/5}) \cdot C + 0,3 \cdot (C_{eb} - C) + 66 \cdot (1 - 0,8 \cdot \log t_{8/5})] \quad (2.9)$$

gdje je

$$C_{eb} = C + Si/11 + Mn/8 + Cr/5 + Mo/6 + V/3 + Ni/17 + Cu/9 \quad (2.10)$$

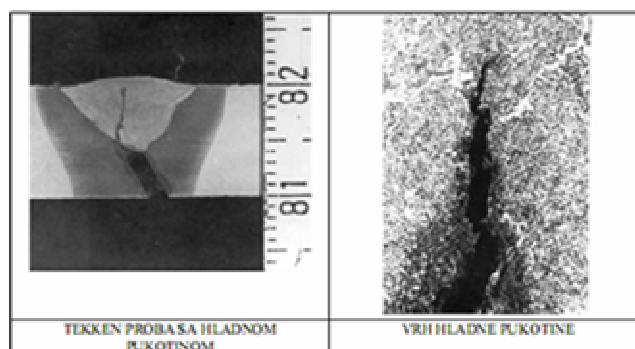
#### 2.8.4. Ispitivanje pukotina prema Tekken metodi

Radi se o jednostavnom ispitivanju zasnovanom na dilataciji zavarenih limova. Ovo ispitivanje je našlo široku primjenu u svom osnovnom i modificiranom obliku. Može se koristiti kao tehnološko ispitivanje pri postupku elektrolučnog ispitivanja i zavarivanja pod praškom, za relativno tanke limove (12 mm), kao i za one čija je debljina do 150 mm. Ispitivanje se koristi za izbor parametara zavarivanja korijenskog dijela sučeljenih spojeva. [21]



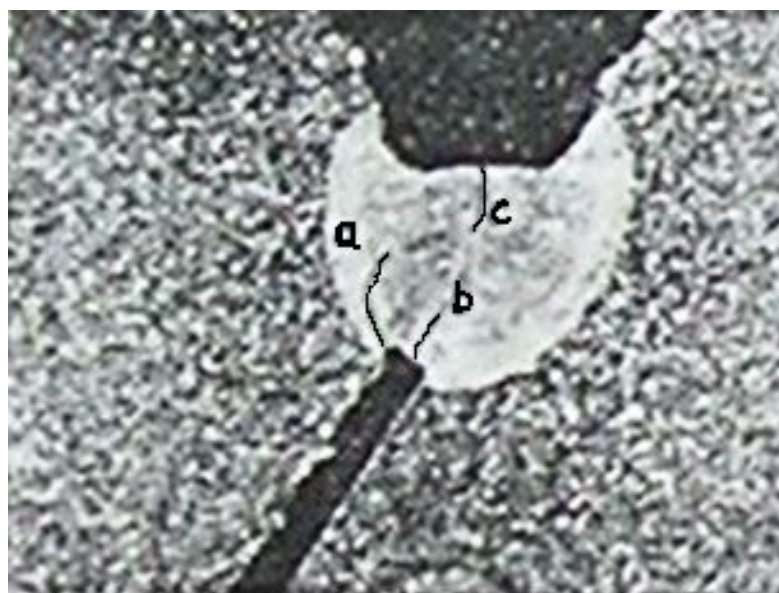
**Slika 2.8.5 Priprema spojeva za Tekken metodu [39]**

Pukotine se najčešće javljaju od prelazne zone do ZUT-a, što ukazuje na to da je pogodno za razlikovanje raznih osnovnih materijala. Manje je osjetljivo na promjene dodatnog materijala. Dimenzije uzorka i oblik skošenja stranica spoja prikazano je na *slici*. Uzorak se najčešće priprema od dvije međusobno zavarene ploče, pri čemu zazor u korijenu Y spoja treba biti 2mm. Za tehnologiju zavarivanja pod praškom pomoćni šav se završava do kraja na jednoj strani. Neki japanski radovi ukazuju na intenzitet krutosti uzorka ne ovisi izrazito od širine i dužine ispitanog lima. [21,39]



**Slika 2.8.6 Pukotina uzrokovana vodikom [55]**

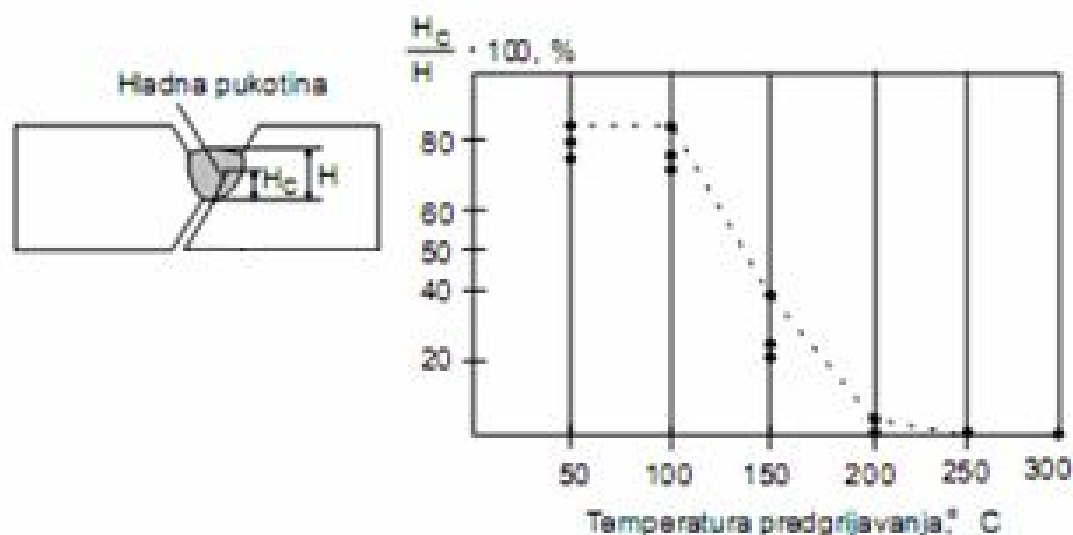
Pri ovom ispitivanju javljaju se 3 tipa pukotina. To su pukotine koje nastaju u prijelaznoj zoni donjeg dijela korijenskog spoja *a*, na strani X pripreme ispitnog spoja. To su tipične hladne pukotine (uzrokovane vodikom), koje se šire do ZUT-a i mogu se vratiti natrag do metala zavora. [21]



**Slika 2.8.7 Tipovi pukotina [21]**

Pukotine tipa *b* i *c* nastaju u metalu zavora pri čemu se mogu spajati. Ove pukotine nisu samo tip hladnih pukotina. Ispitivanje se ocjenjuje metalografskom analizom na 5 isječaka, od kojih su dva iz početnog i završnog kratera. Iz ovih analiza se određuje % pojave pukotina po dužini uzorka u ovisnosti od parametara zavarivanja (npr. temperatura predgrijavanja). Na slici je ucrtano ovakvo ocjenjivanje. [21]





**Slika 2.8.8 Omjer pukotine i zavora [55]**

Parametar zavarivanja kao što je temperatura predgrijavanja, da bi se prihvatio mora imati uspješno izvedena 3 uzorka, znači bez pukotine. Utjecajni parametri za izbjegavanje pukotina jesu: sadržaj vodika u metalu zavora, temperatura predgrijavanja i unos topline. Kad se pukotina pojavi, klasifikacija zavarenog uzorka izvodi se uvođenjem "koeficijenta pukotine". Koeficijent pukotine jednostavno se izračuna omjerom visine pukotine i visine zavarenog spoja, kao što je i prikazano na slici. [39]

Procedura izvođenja testa:

- prvo se zavare pomoćni zavari, a tek onda ispitni zavar, pomoćnim zavarima ploča je ukrućena (nema stezanja i rastezanja)
- epruveta se ostavi 48 sati da stoji i zatim se ispituje
- ispitivanja se vrše prvo vizualnim pregledom, zatim sa penetrantskim tekućinama, a zatim se zavar reže na tri mjesta, rade se izbrusci i promatraju mikroskopom
- u ovisnosti o duljini i visini pukotina zaključujemo o sklonosti prema hladnim pukotinama

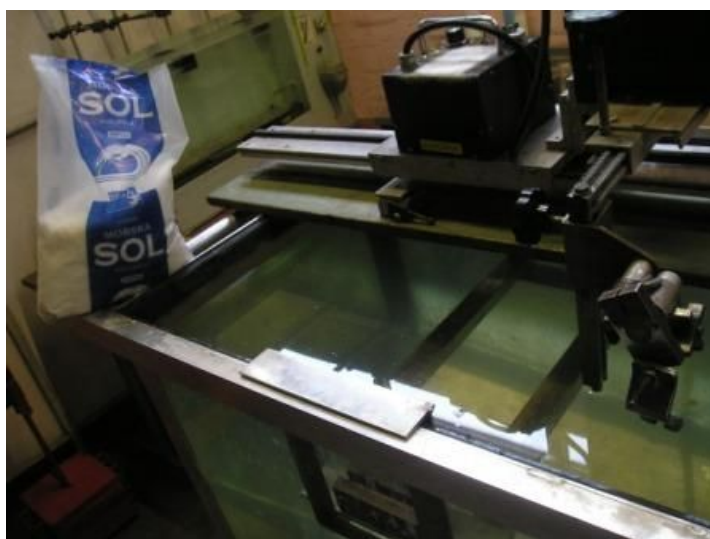
### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

Zbog oskudne zastupljenosti u praksi metode Tekken pri pokusnim istraživanjima sklonosti materijala prema nastanku hladnih pukotina provedena je provjera mogućnosti aplikacije Tekken metode u mokrom podvodnom zavarivanju.

#### 3.1. Opis eksperimenta

Eksperimentalni dio diplomskog rada u potpunosti je izveden u laboratorijima FSB-a, od grubog rezanja zračnom plazmom, izrade uzoraka strojnom obradom, zavarivanja pomoćnih zavara MAG postupkom, podvodnog REL zavarivanja ispitnog zavara, ispitivanja penetrantima, plinskog rezanja na trake, hladnog rezanja pilom, brušenja u vodi sve do ispitivanja tvrdoće zavarenih uzoraka na tvrdomjeru.

Za provođenje podvodnog zavarivanja korišten je mali bazen zapremine 500 litara. Zavarivanje je provedeno na istoj dubini od 250 mm, u umjetnoj morskoj vodi saliniteta 35 do 38 ‰, uz temperaturu vode od 22 do 27 °C i temperaturu zraka od 22 do 30 °C.

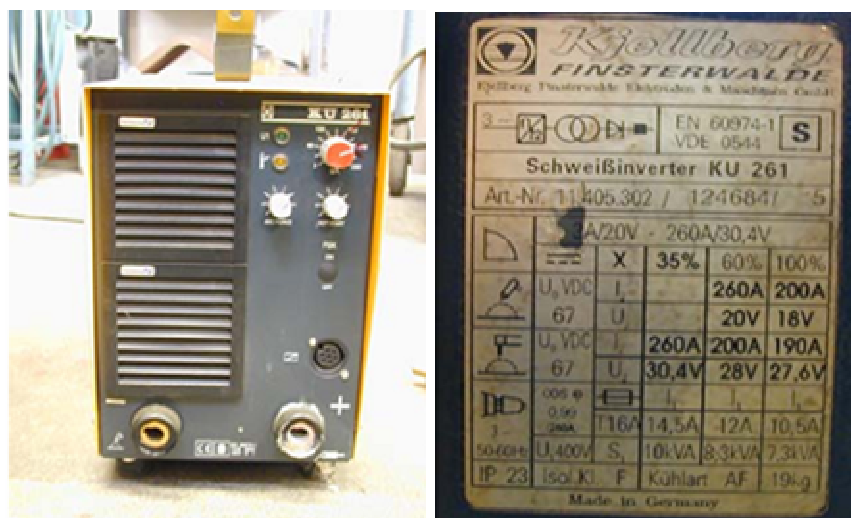


**Slika 3.1 Priprema umjetne morske vode**

Za svaki postupak predpokusom su optimalizirani parametri koji su dali tri jednaka unosa topline od približno 12, 15 i 18 kJ/cm. Parametri zavarivanja su konstantno provjeravani pri radu, napon zavarivanja digitalnim voltmetrom a jakost struje zavarivanja strujnim kliještima.

Uzorci za određivanje hladnih pukotina Tekken metodom izrađeni su iz stijenke cijevi materijala API 5L X70 debljine 16mm i promjera 700mm. Ukupno je zavareno 3 uzorka za određivanje hladnih pukotina, gdje je kasnije svaka ploča bila izrezana na 3 dijela i tako je dobiveno 9 konačnih uzoraka za analizu i iznošenja zaključaka.

### 3.2. Izvor struje za zavarivanje



Slika 3.2 Uređaj za REL zavarivanje

### 3.3. Dodatni materijal

Kao što smo u točki 4.1. spomenuli, za REL zavarivanje korištena je elektroda Lastek 1008 promjera 3,25 i 4 mm. Ta elektroda namjenjena je za podvodno zavarivanje čelika povišene i visoke čvrstoće s rutilnom oblogom kojoj je dodan željezni prah i Ni. Obloga elektrode premazana je prozirnim polimernim slojem koji održava stabilnost obloge i sprečava prodor vode te je ujedno i izolator čime se povećava sigurnost ronionca i stabilnost električnog luka. Preporučljiva je primjena istosmjerne, DC struje na minus (-) polu.

Tablica 3.1. Kemijski sastav metala zavara elektrode Lastek 1008 (suho zavarivanje) [34]

Kemijski element	C	Mn	Si	S	P	Ni
Maseni udio, %	0,05	0,5	0,45	0,025	0,025	0,30

Tablica 3.2. Mehanička svojstva metala zavara elektrode Lastek 1008 [34]

Uvjeti zavarivanja	Vlačna čvrstoća $R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	Istezljivost A, %	Kontrakcija Z, %	Udarna radnja loma, Kv
Suho zavarivanje	540	26	70	62 J pri 0°C
Mokro zavarivanje	564	12 do 13,5	47	50-54 J pri -20°C

Elektroda Lastek 1008 zadovoljava sve zahtjeve na mehanička svojstva za klasu zavara B prema normi AWS D3.6-1999 dok su pri ispitivanjem prozračivanjem postignuti zahtjevi klase zavara A prema normi AWS D3.6-1999.

Klasifikacija prema normama (najbliži ekvivalent):

AWS: E 7014 (E 6013)

EN 499: E 46 2 1Ni RR 5 1 H15

### 3.4. Osnovni materijal

Osnovni materijal je čelik X70 prema normi API 5L. Kemijski sastav određen u Laboratoriju za analizu metala FSB prikazan je u tablici 3.3.

**Tablica 3.3. Kemijski sastav čelika API 5L X70 [16]**

Kemijski element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	Nb	V
Maseni udio, %	0,091	0,30	1,72	0,011	0,011	0,03	0,03	0,12	0,025	0,05	0,06
Zahtjev prema normi API 5L, max%	0,22	-	1,65	0,025	0,015	-	-	-	-	-	-

Za udio ugljika vrijedi da je svako smanjenje od 0,01% od specificiranog maksimalnog udjela moguće povećati udio mangana za 0,05% iznad maksimalno propisanog udjela do najviše 2% mangana za čelike gradacije X70 tako da vrijednost od 1,72% Mn zadovoljava uvjete. Udio nečistoća fosfora i sumpora ispod je dozvoljene granice. Mehanička svojstva čelika X70 slijede u tablici 3.4.

**Tablica 3.4. Zahtjevi za mehanička svojstva za čelik X70 prema normi API 5L [16]**

Gradacija čelika	Granica razvlačenja, $R_{e \min}$ , N/mm <sup>2</sup>	Granica razvlačenja, $R_{e \max}$ , N/mm <sup>2</sup>	Vlačna čvrstoća, $R_m \min$ , N/mm <sup>2</sup>	Vlačna čvrstoća, $R_m \max$ , N/mm <sup>2</sup>
X70	483	621	565	758

Prema normi API 5L za čelike s manje od 0,12% ugljika, ekvivalent ugljika se izračunava prema Itto-Bessyo formuli:

$$P_{cm} = \%C + \%Si/30 + 1/20 (\%Mn + \%Cu + \%Cr) + \%Ni/60 + \%Mo/15 + \%V/10 + 5\%B \quad (3.1)$$

pri čemu  $P_{cm}$  ne smije biti veći od 0,25%. Za šaržu čelika primjenjenu u ovom praktičnom dijelu  $P_{cm}$  iznosi **0,204**.

Ako analiziramo zavarljivost čelika gradacije X70 prema normi AWS D3.6M: 1999 Specification for underwater welding potrebno je odrediti **CE** prema izrazu:

$$CE = \%C + \%Mn/6 + 1/5 (\%Cr + \%Mo + \%V) + 1/15 (\%Ni + \%Cu) \quad (3.2)$$

Za šaržu čelika primijenjenu u ovom eksperimentu dobiva se vrijednost **CE**=0,423. Ako se uzmu u obzir preporuke iz norme AWS D3.6M: 1999 Specification for underwater welding koje definiraju materijale s **CE** >0,4 kao neprikladne za podvodno zavarivanje, vidljivo je da za ovu šaržu primjena mokrog podvodnog zavarivanja može se smatrati problematičnim. S druge strane, postoji sve intenzivnija primjena ove vrste čelika, pa i onih viših čvrstoća, u izgradnji podvodnih cjevovoda i postrojenja. To svakako ukazuje na potrebu za razvojem tehnologija podvodnog zavarivanja koje će moći osigurati adekvatna mehanička svojstva i kompenzirati specifičnosti osnovnog materijala. Nužno je usvojiti odgovarajuće modele za procjenu zavarljivosti modernih čeličnih materijala s aspekta podvodnog zavarivanja jer je proces zavarivanja daleko kompleksniji nego u normalnim uvjetima te nije moguće primjeniti iste kriterije i ulazne varijable.

### 3.5. Parametri zavarivanja

Za ispitivanje sklonosti čelika X70 hladnim pukotinama primjenjena je metoda Tekken. Za ovo ispitivanje izrađeno je tri zavarene probe, na tri razine unosa topline, 12, 15 i 18 kJ/cm. Parametri zavarivanja uzoraka Tekken navedeni su u tablici 3.5.

**Tablica 3.5. Parametri zavarivanja**

Uzorak	$\Phi$	I, A	U, V	Nagib elektrode, °	$v_z$ , cm/min	Unos topline, kJ/cm
1.	3,25	180	28	70-80	18	12
2.	4,0	240	29	70-80	19	15
3.	4,0	270	32	70-80	20	18

Specifična unešena toplina po dužinskoj mjeri je zbog disipacije topline u vodi smanjena, a koeficijent iskoristivosti električnog luka pri REL-u  $\eta_{REL} = 0,65 - 0,75$ . Vrsta struje i polaritet je DC (-).

$$q = \frac{Q}{v_{zav}} = \frac{U \cdot I \cdot \eta_{REL} \cdot 60}{v_{zav} \cdot 1000}, \left[ \frac{kJ}{cm} \right] \quad (3.1)$$

Slijede laboratorijski pokusi mokrog podvodnog zavarivanja primjenom REL-a (ručnoelektrolučno zavarivanje). Za REL zavarivanje korištene su elektrode Lastek 1008 promjera 3,25 i 4 mm. Zavareno je tri uzorka, standardna sučeona priprema spoja za Tekken test. Prije samog postupka zavarivanja izvodi se proba radi traženja optimalnih parametara zavarivanja, provjera opreme, elektroda i radi uhodavanja zavarivača.

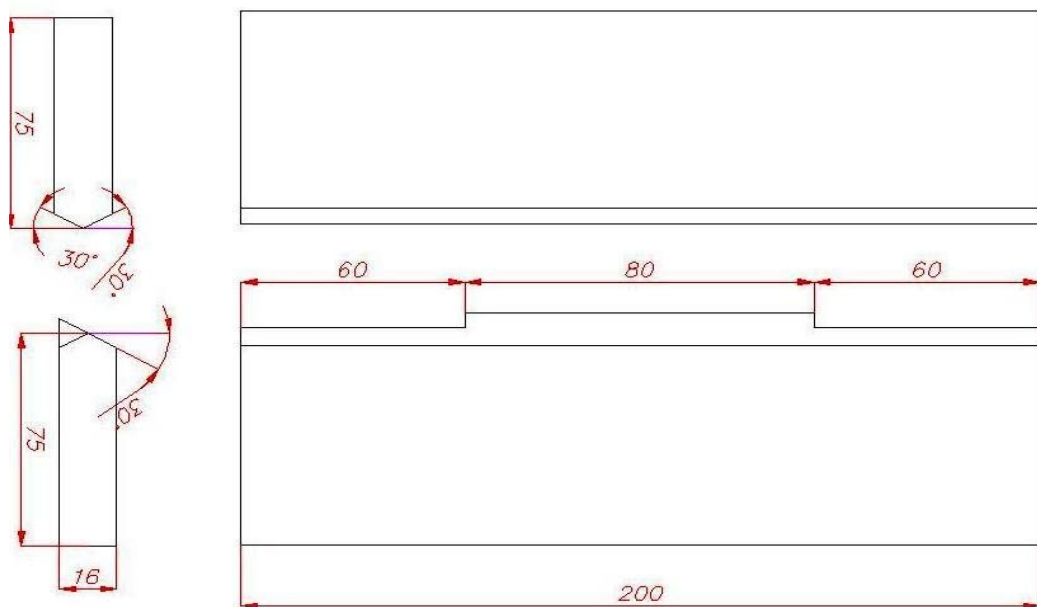


**Slike 3.5.1 Mjerenje parametara zavarivanja**

Slijedi niz fotografija koje opisuju postupak izvođenja podvodnog mokrog REL zavarivanja kao i svih popratnih radnji i ispitivanja koje su potrebne za izvršenje eksperimenta, dobivanja rezultata te zaključivanja na osnovu njih.



**Slika 3.5.2 Rezanje ploča zračnom plazmom na grube mjere**

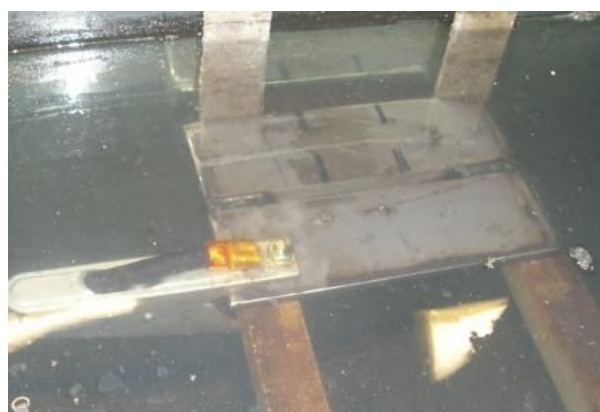


**Slika 3.5.3 Nacrt za obradu ploča glodanjem i prikaz pripreme uzorka nakon strojne obrade**





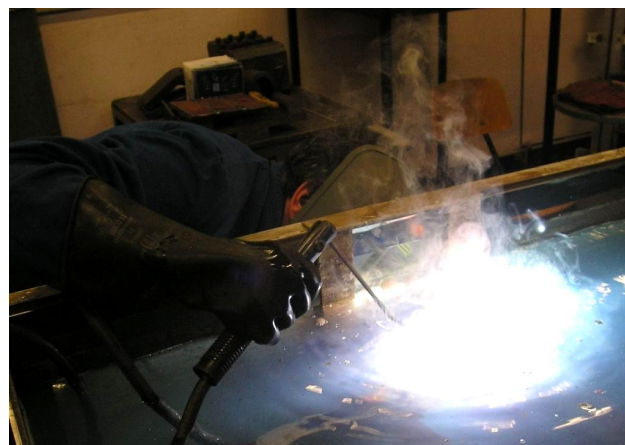
**Slika 3.5.4 Zavarivanje pomoćnih zavora  
MAG postupkom**



**Slika 3.5.5 Uzorak pripremljen za  
zavarivanje ispitnog zavora**



**Slika 3.5.6 Pozicioniranje pištolja na  
početak ispitnog Y-spoja**

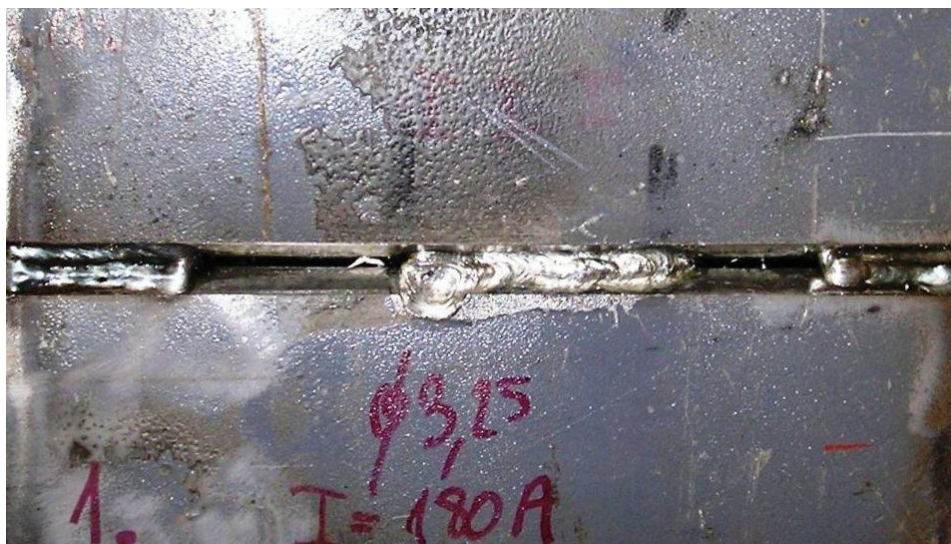


**Slika 3.5.7 Podvodno REL zavarivanje  
ispitnog Y-spoja**



**Slike 3.5.8 Čišćenje ispitnog zavora žičanom četkom i čekićem**





Slika 3.5.9 Izgled zavarenog uzorka 1 za Tekken-test s unosom topline 12 kJ/cm



Slika 3.5.10 Izgled zavarenog uzorka 2 za Tekken-test s unosom topline 15 kJ/cm



Slika 3.5.11 Izgled zavarenog uzorka 3 za Tekken-test s unosom topline 18 kJ/cm

Poslije zavarivanja uslijedila vizualna kontrola zavarenih spojeva i uočene su pukotine po cijeloj duljini zavora. Nakon očitih pukotina nije trebalo čekati 48 sati da bismo tek tada ispitivali penetrantima te smo izvršili penetrantska ispitivanja po proceduri.



a)



b)



c)

**Slike 3.5.12 Faze ispitivanja penetrantima:**

**a) nanošenje odmašćivča**

**b) nanošenje penetranta**

**c) brisanje penetranta te nanošenje razvijča**

Nakon čišćenja odmastivačem uslijedilo je nanošenje penetranta i nakon izvjesnog vremena očišćena površinski od penetranta, a zatim nanesena je i "kreda", odnosno razvijča. Uočene su razmjerno velika mrlja izvučenog penetranta na kredu. Zaključak je jasan da su pukotine bile poprilično duboke.

Zatim su ploče plinski izrezane na trake, te su numerirane i označene gdje će se pilom hladno rezati, po tri uzorka od jedne ploče.



**Slika 3.5.13 Plinsko rezanje na trake****Slika 3.5.14 Numeriranje i zacrtavanje iglom****Slike 3.5.15 Uzorci pripremljeni za hladno rezanje uz pomoć pile**

Tako smo dobili devet uzoraka od kojih smo izabrali šest na kojima ćemo izvršiti vodeno brušenje do gradacije brusnog papira P600. Prije nego se pristupilo brušenju uzorke je trebalo pripojiti sa stražnje strane MAG postupkom jer se prilikom rezanja uzorak razdvojio. Brušenje je izvođeno naizmjeničnim okretanjem uzorka svaki put kad se prelazi na višu granulaciju brusnog papira zbog izbjegavanja nastajanja risova i mikro brazda.



**Slike 3.5.16 Nagrizanje brušenih uzoraka u otopini dušične kiseline**

Zatim uzorci bivaju nagriženi sa 5%  $\text{HNO}_3$  otopinom dušične kiseline 15-ak sekundi, u alkoholu neutralizirani i odloženi da se posuše nakon čega su fotografirani i spremni za metalografsku analizu. Odabirom jednog od tri makroizbruska za svaki zavareni spoj izvedena su mjerenja tvrdoće HV10.


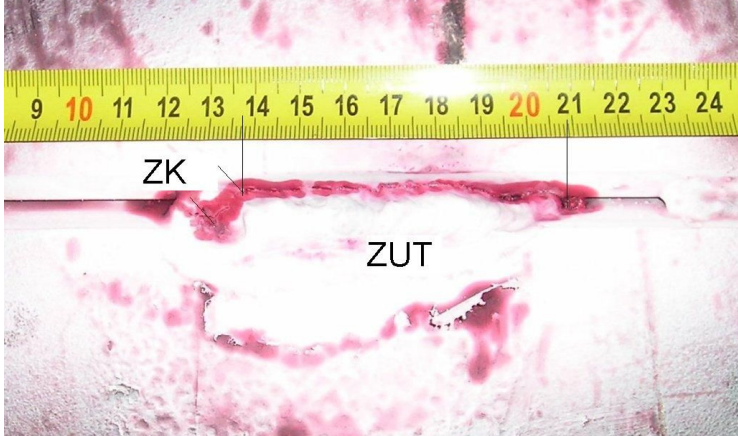
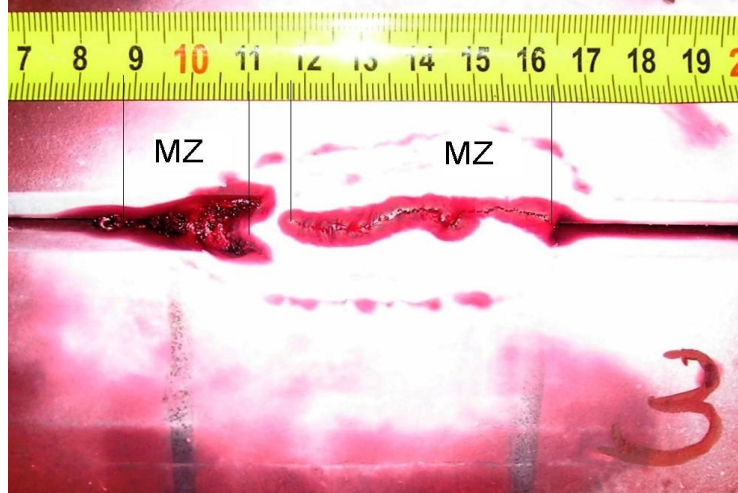
Dakle, planiranim ispitivanjem želimo dobiti rezultate koji će dati brojčane iznose i na temelju toga, s obzirom na postojećeg znanja i literatura, možemo procijeniti mogućnost mokrog podvodnog zavarivanja API 5L X70 čelika kao i sklonost pojavljivanju hladnih pukotina.

#### 4. ANALIZA REZULTATA TEKKE METODE

##### 4.1. Vizualni pregled zavarenih uzoraka

Nakon vizualnog pregleda uočene su na površini pukotine. Da bismo procijenili dubinu i širinu pukotine slijedi analiza rezultata ispitivanja penetrantima.

**Tablica 4.1. Rezultati ispitivanja penetrantima**

<p>Uzdužna pukotina nastala od početka ispitnog zavora duga je 47 mm, a locirana je u zoni utjecaja topline.</p> <p>Prema HRN EN 26 520 oznaka uzdužne pukotine u ZUT-u je 1013.</p> <p>Uzdužna pukotina nastala u metalu zavora i ima smjer prema završnom krateru i duga je 25mm.</p> <p>To su dvije nepovezane pukotine.</p>	 <p><b>Slika 4.1.1 Ispitivanje penetrantima uzorka 1 s unosom topline 12 kJ/cm</b></p>
<p>Uzdužna pukotina nastala od početka ispitnog zavora duga je 73 mm, a locirana je u zoni utjecaja topline.</p> <p>Prema HRN EN 26 520 oznaka uzdužne pukotine u ZUT-u je 1013.</p> <p>Dalje nastavlja u koso prema sredini završnog kratera duljine 16 mm.</p>	 <p><b>Slika 4.1.2 Ispitivanje penetrantima uzorka 2 s unosom topline 15 kJ/cm</b></p>
<p>Uzdužna pukotina nastala od početka ispitnog zavora duga je 47 mm, a locirana je u metalu zavora.</p> <p>Prema HRN EN 26 520 oznaka uzdužne pukotine u MZ je 1011.</p> <p>Postoji i druga pukotina u završnom krateru, nepovezana sa prvom, duljine 22 mm.</p>	 <p><b>Slika 4.1.3 Ispitivanje penetrantima uzorka 3 s unosom topline 18 kJ/cm</b></p>



## 4.2. Analiza makroizbrusaka

Sljedeća faza provođenja Tekken metode je analiza parametra pukotine, odnosno omjera veličine pukotine i visine zavora.

### 4.2.1. Uzorak 11



Slika 4.2.1 Lice zavora uzorka 11 sa unosom topline 12 kJ/cm



Slika 4.2.2 Makroizbrusak uzorka 11 sa unosom topline 12 kJ/cm

Koeficijent pukotine, odnosno omjer visine pukotine i visine zavora iznosi 0.777, ili 77,7%.

Iz makroizbruska se vidi kako je pukotina nastala i napredovala u ZUT-u. Dužine je 7 mm.

**4.2.2. Uzorak 12**

**Slika 4.2.3 Lice zavara uzorka 12 sa unosom topline 12 kJ/cm**



**Slika 4.2.4 Makroizbrusak uzorka 12 sa unosom topline 12 kJ/cm**

Koeficijent pukotine, odnosno omjer visine pukotine i visine zavara iznosi 0.775, ili 77,5%.

Pukotina je nastala u ZUT-u i napredovala u metal zavara. Dužine je 8 mm. Oko 3 mm je u ZUT-u a ostlao u MZ.

#### 4.2.3. Uzorak 21



**Slika 4.2.5 Lice zavora uzorka 21 sa unosom topline 15 kJ/cm**



**Slika 4.2.6 Makroizbrusak uzorka 21 sa unosom topline 15 kJ/cm**

Koeficijent pukotine, odnosno omjer visine pukotine i visine zavora iznosi 0.75, ili 75%.

Osim što se primjećuje pogreška u obliku šupljikavosti, primjećuje se i hladna pukotina koja je nastala u potpunosti u ZUT-u. Veličine je 10 mm. Oko 6 mm je u ZUT-u, a 4 mm u MZ.



**4.2.4. Uzorak 22**

**Slika 4.2.7 Lice zavara uzorka 22 sa unosom topline 15 kJ/cm**

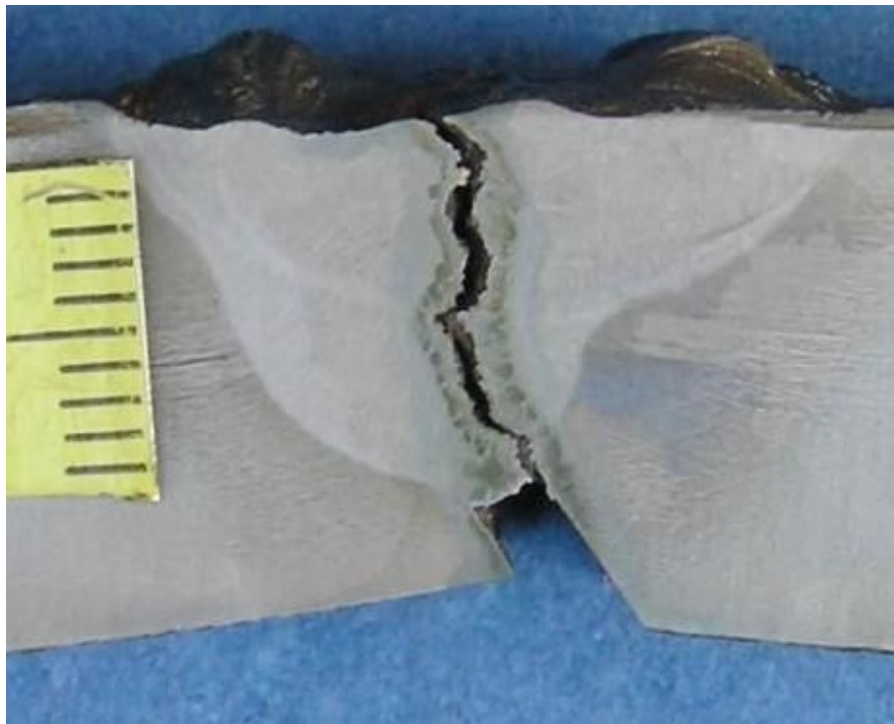


**Slika 4.2.8 Makroizbrusak uzorka 22 sa unosom topline 15 kJ/cm**

Koeficijent pukotine, odnosno omjer visine pukotine i visine zavara iznosi 0.7, ili 70%. Jasno se vidi da je hladna pukotina nastala u ZUT-u i napredovala u MZ uz liniju staljivanja. Dužine je 5 mm.

**4.2.5. Uzorak 32**

**Slika 4.2.9 Lice zavara uzorka 32 sa unosom topline 18 kJ/cm**



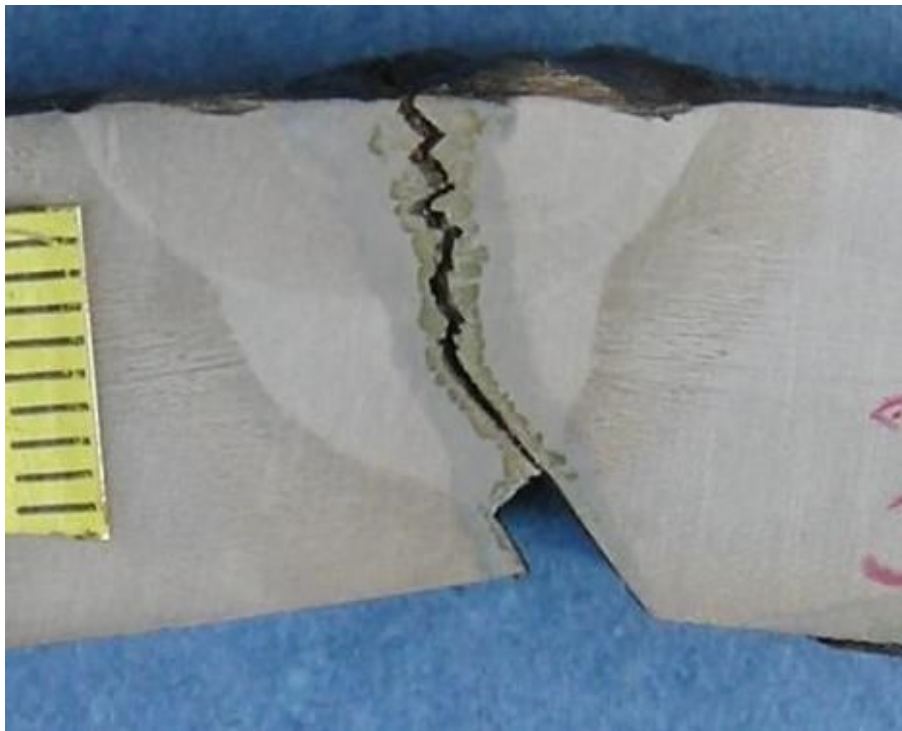
**Slika 4.2.10 Makroizbrusak uzorka 32 sa unosom topline 18 kJ/cm**

Koeficijent pukotine, odnosno omjer visine pukotine i visine zavara iznosi 0.94, ili 94%.

Pukotina je nastala u ZUT-u i odmah napredovala po sredini zavara cijelom visinom, u metalu zavara.

**4.2.6. Uzorak 33**

**Slika 4.2.11 Lice zavora uzorka 33 sa unosom topline 18 kJ/cm**

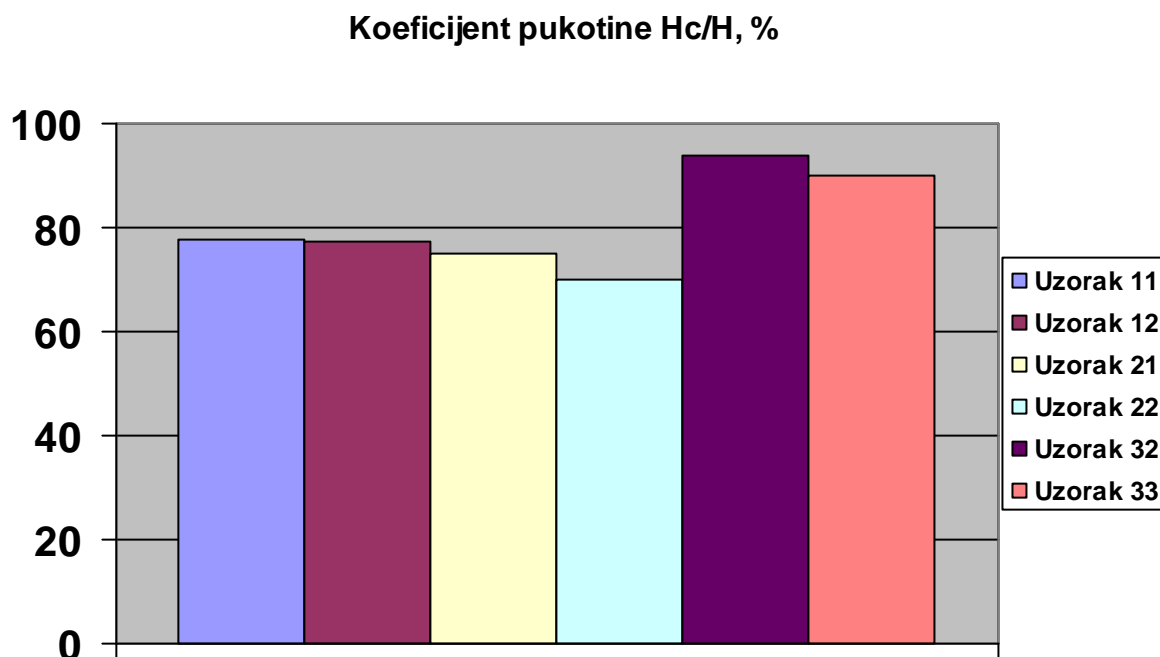


**Slika 4.2.12 Makroizbrusak uzorka 33 sa unosom topline 18 kJ/cm**

Koeficijent pukotine, odnosno omjer visine pukotine i visine zavora iznosi 0.9, ili 90%.

Isto kao i prethodna slika, pukotina je nastala u ZUT-u i odmah napredovala po sredini zavora cijelom visinom, u metalu zavora.

#### 4.2.7. Usporedba koeficijenata pukotine



**Slika 4.2.13 Usporedba koeficijenata pukotina**

Koeficijent pukotine razmjerno raste s obzirom na to da se pukotina povećanim unosom topline "seli" iz zone utjecaja topline u metal zavora.

Pregledom makroizbruska vidimo da uzorci zavareni REL potupkom imaju čisti metal zavora, ne postoje pukotine niti pore, niti uključci troske. Dobra je popunjenost presjeka i ravnomjernost polaganja slojeva. Prema čistom i homogenom zavaru vidljivo je da je obloga elektrode prilagođena za ove uvjete podvodnog zavarivanja.

Da li će pukotina nastupiti u ZUT-u ili MZ, prema [37] ovisi o kemijskom sastavu metala zavora u odnosu na osnovni materijal. Za CMn čelike čvrstoće do 500 N/mm<sup>2</sup> uobičajeni nastanak vodikovih pukotina je u zoni utjecaja topline (ZUT), dok za čelike povišene i visoke čvrstoće od 600 N/mm<sup>2</sup> očekivani nastanak vodikovih pukotina je u metalu zavora (MZ). Literatura je puno siromašnija sa podacima o nastanku vodikovih pukotina u MZ nego što je za pukotine nastale u ZUT-u. Uglavnom je poznato da je faktor predgrijavanja značajan i da se pukotine na taj način mogu ukloniti, ali postoje neke formule koje su u fazi istraživanja te postoje pitanja kao što su npr. da li debljina materijala utječe na nastajanje hladnih pukotina ili npr. da li povećani unos topline utječe pozitivno ili negativno na nastanak hladnih pukotina u MZ. Neki navodi u [37] po pitanju unešene topline spominju provedena ispitivanja sa unešenim toplinama od 15 do 50 kJ/cm, te da se

pukotine nisu pojavile ali s druge strane povećanje unosa dosta je smanjilo tvrdoću u metalu zavora pa stoga treba naći optimum parametara za izbjegavanje s jedne strane pojave pukotina a s druge smanjenje mehaničkih svojstava u metalu zavora.

Za izbjegavanje nastanka pukotina u [41] navodi se da u prvome redu treba izvoditi konstrukcijska rješenja zavarane konstrukcije sa što manjom ukrućenosti zavarjenog sklopa, uz izbor oblika spoja sa što manje unesenog dodatnog materijala. Vrlo je važan pravilan izbor postupka zavarivanja, parametara i ostalih uvjeta zavarivanja, pri čemu *unos toplinske energije* – ima važnu ulogu. Premali unos topline povećava sklonost hladnim pukotinama, a preveliki pogrubljenju zrna, smanjenju žilavosti pa i sklonosti toplim pukotinama.



### 4.3. Mjerenje tvrdoće (HV10) na uzorcima

#### 4.3.1 Tvrdoća materijala

Tvrdoća je otpornost materijala prema prodiranju drugog, znatnije tvrdog tijela. Za samo ispitivanje ne treba izraditi posebnu epruvetu, nego samo odgovarajuće pripremiti plohe uzoraka ili strojnog dijela. Uređaji za mjerenje tvrdoće, tvrdomjeri, u pravilu su jednostavniji i jeftiniji od nekih drugih uređaja za ispitivanje mehaničkih svojstava, npr. kidalica.

Osnovni princip mjerenja tvrdoće kod većine metoda je mjerenje veličine ili dubine otisaka što ga penetrator (indentor ili utiskivač), opterećen nekom silom, načini u ispitivanom materijalu. To je dakako izvedivo jedino za materijale kod kojih je moguća neka trajnija plastična deformacija. Penetratori oblika su kuglice, stošca ili piramide, a izrađeni su od tvrdih materijala (kaljeni čelik, tvrdi metal ili dijamant). Kod danas najčešće primjenjivih metoda za mjerenje tvrdoća (Brinell, Vickers, Rockwell), djelovanje je statičko. [40]

Kod Vickersove metode penetrator je od dijamanta i oblikom četverostrane piramide s kutem od  $136^\circ$  između stranica, što je kut koji zatvaraju tangente na Brinellovu kuglicu pri optimalnoj veličini očvrsnuća  $d=0,35 \cdot D$ , gdje je  $d$  promjer ostavljenog traga u ispitnom materijalu, a  $D$  je promjer Brinellove kuglice. Po definiciji tvrdoća po Vickersu jednaka je onoj Brinellovoj, a izračunava se izrazom: [40]

$$HV = \frac{F \cdot 0,102}{S}, \quad (4.1)$$

pri čemu je  $F$ , N, sila, a  $S$ , mm<sup>2</sup>, ploština otisnuća nakon rasterećenja. Budući da se mjeri dijagonala baze otisnuća (kvadrata), ploština otisnuća izražava se pomoću dijagonale "d" te slijedi:

$$HV = \frac{F \cdot 0,188}{d^2}, \quad (4.2)$$

pri čemu je  $F$ , N, sila, a  $d$ , mm, srednja vrijednost od dvije izmjerene dijagonale otisnuća.

Uobičajeni iznosi sile kod Vickersove metode iznose od 49 do 980 N. Trajanje opterećivanja penetratora iznosi od 10 do 15 s, a iznimno se za mekane materijale može i produljiti. Vickersova tvrdoća je bezdimenziolna veličina, a uz iznos tvrdoće navodi se i sila opterećivanja, npr. 430 HV10, što znači da je izmjerena tvrdoća iznosila 430 HV i da je dobivena utiskivanjem penetratora silom od 10·9,81 N u trajanju od 10 do 15 sekundi. Kod Vickersove metode potrebna je brižljiva priprema mjerne površine koja pogotovo za mjerenje semitvrdoće i

mikrotvrdoće uključuje i poliranje uzorka. Također je zbog sitnog otiska za mjerenje dijagonale potreban mjerni mikroskop. [40]

#### 4.3.2. Provođenje ispitivanja tvrdoće

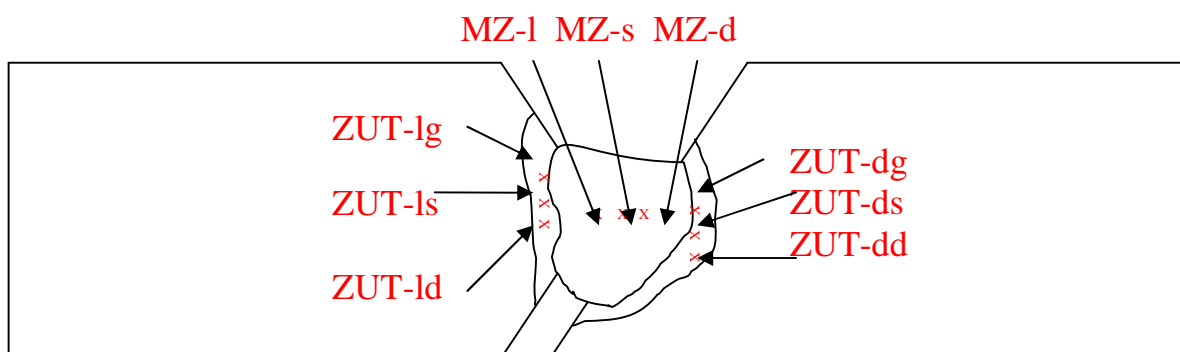
U okviru istraživanja provedeno je i ispitivanje tvrdoće HV10 na pojedinim uzorcima, nakon provođenja zavarivanja proba Tekken. Na uzorcima s obrađenom površinom brušenjem u vodi izvršavaju se mjerenja tvrdoće prema planu pokusa Vickers metodom (HV10) na uređaju Reichert TM12, prema normi HRN EN 1043 – 1:1995. Često se mjerenje tvrdoće uzima kao kontrolni faktor za procjenu zavarljivosti, odnosno zakaljivosti.



**Slika 4.3.1 Tvrdomjer Reichert TM12**

Prema normi AWS D3.6M:1999 kao maksimalna tvrdoća za zavare klase B i minimalnu vlačnu čvrstoću osnovnog materijala od  $550 \text{ N/mm}^2$  propisuje vrijednosti maksimalnu tvrdoću od 375 HV10, u praksi se pojavljuju i više vrijednosti.

Tvrdoća se mjerila u devet točaka po uzorku. Posebno se obratila pozornost na liniju staljivanja i mjerenje tvrdoće od linije prema vidljivom ZUT-u. Po tri ispitna mjesta po sredini metala zavara horizontalno i po tri sa svake strane u ZUT-u razmjerno vertikalno.



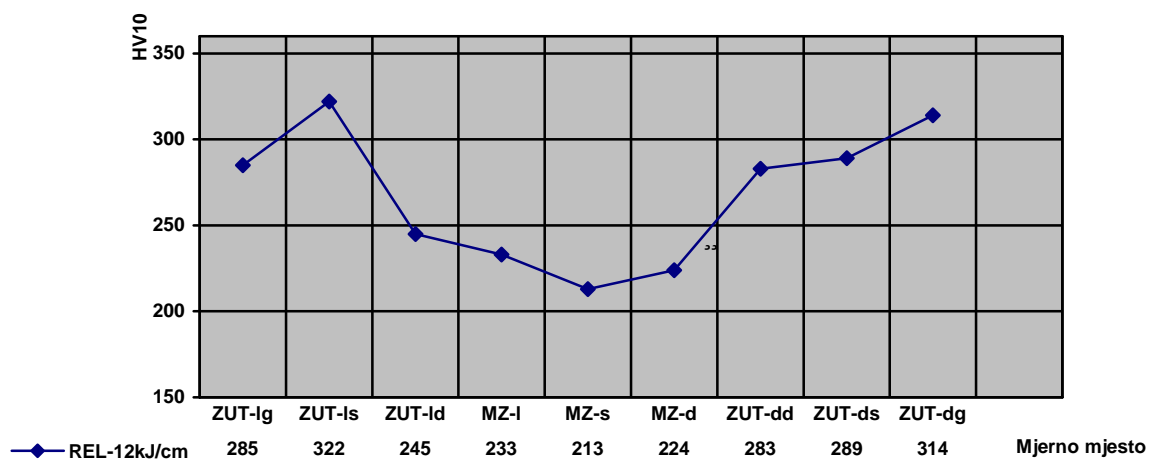
**Slika 4.3.2 Raspored mjernih mjesta za određivanje tvrdoće**

Po uzorku izmjereno je 9 točaka plus jedna za osnovni materijal. Tako vrijednost tvrdoće osnovnog materijala iznosi u prosjeku 243,7. budući da je vrijednost **CE** za ovu šaržu čelika 0,423, očekivane su povišene vrijednosti tvrdoća.





**Tvrdoća HV10 REL-12kJ/cm**

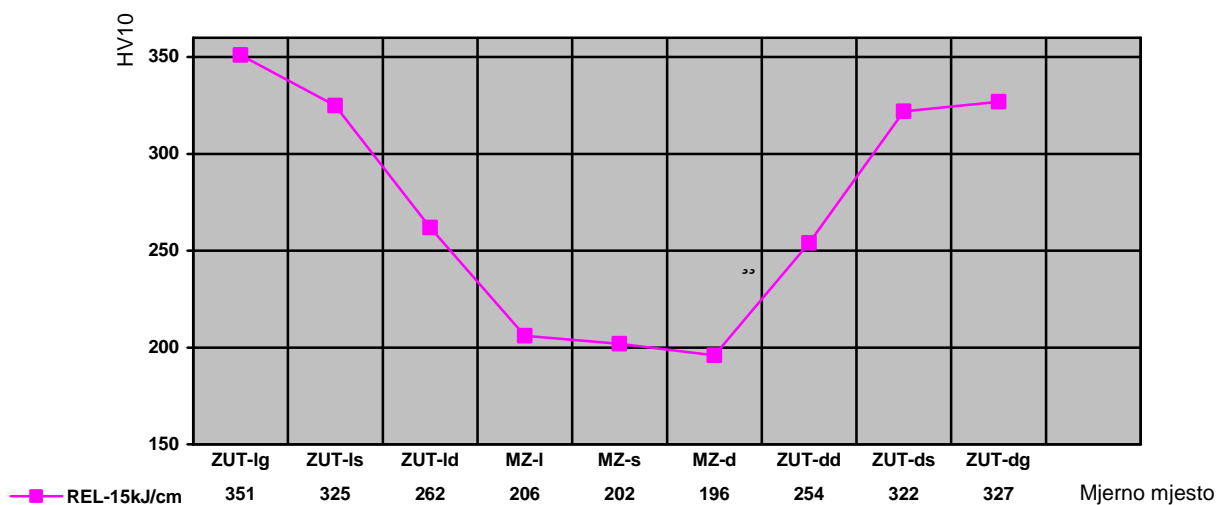


**Slika 4.3.3 Grafički prikaz tvrdoća kod uzorka 11**

Pri zavarivanju REL postupkom vidljivo je povišenje tvrdoće u ZUT-u, tako interval maksimalnih vrijednosti, također u ZUT-u, je od 285 do 322 HV10. Dakle i TTT dijagrama očitamo brzinu hlađenja 50°C/s, a mikrostruktura je martenitno-bainitna.



Tvrdoća HV10 REL-15kJ/cm

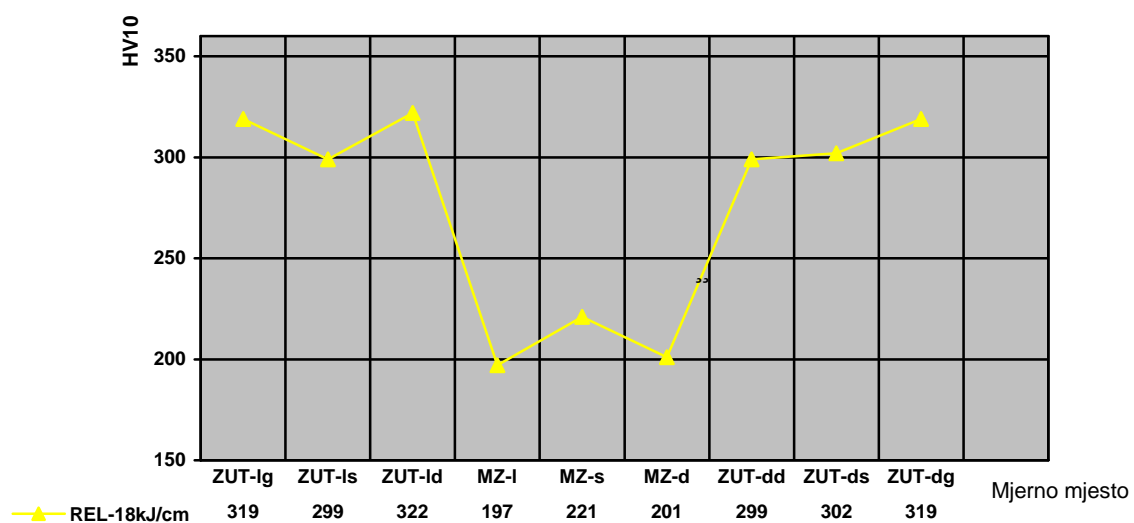


Slika 4.3.4. Grafički prikaz tvrdoća kod uzorka 22

Zaključujemo prema TTT dijagramu da je brzina hlađenja iznosila oko  $75^{\circ}\text{C/s}$ , a mikrostruktura je i dalje martenzitno-bainitna. Budući da prema normi AWS D3.6M: 1999 kao maksimalna tvrdoća za zavare klase B i minimalnu vlačnu čvrstoću osnovnog materijala od  $550 \text{ N/mm}^2$  iznosi 375 HV10, ova proba sa najvišim vrijednostima zadovoljava s obzirom na dobivene rezultate.

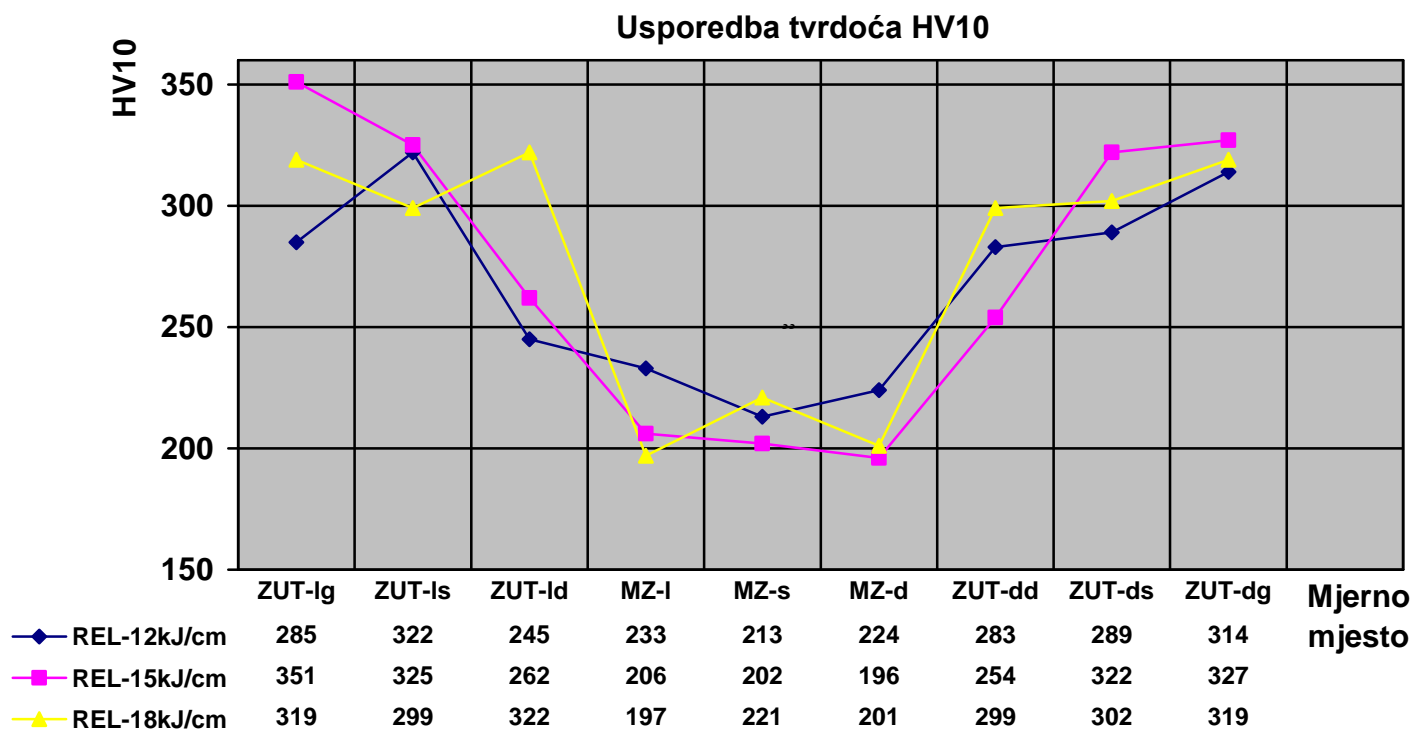


**Tvrdoća HV10 REL-18kJ/cm**



**Slika 4.3.5 Grafički prikaz tvrdoća kod uzorka 33**

Pri zavarivanju REL postupkom vidljivo je povišenje tvrdoće, tako interval maksimalnih vrijednosti, također u ZUT-u, je od 299 do 319 HV10. Dakle i TTT dijagrama očitamo brzinu hlađenja 50°C/s, a mikrostruktura je martenzitno-bainitna.



**Slika 4.3.6 Grafički prikaz usporedbe tvrdoća kod uzorka 11, 22 i 33**

Mjerenjem dobivene vrijednosti tvrdoće prikazane su na slikama. Tek je jedno mjesto uz liniju staljivanja očitane tvrdoće 351 HV10, neznatno premašilo kritičnu vrijednost tvrdoće 350 HV10.

Najveće tvrdoće su u području korijena od linije staljivanja prema ZUT-u, simetrično na obe strane. Najviše vrijednosti u ZUT-u su u intervalu od 300 do 351 HV10. Zaključujemo prema TTT dijagramu da je brzina hlađenja iznosila oko 75°C/s, martenzitno-bainitnu mikrostrukturu. Budući da prema normi AWS D3.6M: 1999 kao maksimalna tvrdoća za zavare klase B i minimalnu vlačnu čvrstoću osnovnog materijala od 550 N/mm<sup>2</sup> iznosi 375 HV10, praktični dio rada je zadovoljavajući s obzirom na dobivene rezultate, a to dovodi do zaključka da je materijal zavarljiv.

Uočeno je da povećanjem unosa topline tvrdoća u području ZUT-a razmjerno pada zbog dužeg perioda odvođenja topline. [36]

## 5. ZAKLJUČAK

Čelici povišene i visoke čvrstoće zbog svojih svojstava se nalaze u upotrebi bilo kao konstrukcijski elementi (offshore postrojenja), odnosno češće kao cjevovodi, transport energenata (nafta, plin). Zahtjevi za primjenu čelika API 5L X70, odnosno zavarivanje takvih čelika sve su stroži s obzirom na eksploatacijske uvjete u većim dubinama prilikom polaganja ili reparacije cjevovoda.

Obzirom na visoku čvrstoću čelika API 5L X70 povećana je sklonost nastajanju hladnih pukotina, odnosno za ostvarenje kvalitetnog zavarenog spoja kod ovih čelika nužno je smanjiti utjecaje čimbenika koji dovode do nastajanja hladnih pukotina.

Kako bi se ocjenila sklonost hladnim pukotinama pri mokrom podvodnom REL zavarivanju odabrana je TEKKEN metoda pri čemu su uzeti u obzir tri unosa topline; 12, 15, 18 kJ/cm.

Na temelju izvršenih ispitivanja moguće je zaključiti:

1. Prilikom zavarivanja uzoraka REL postupkom nije bilo većih problema, odnosno uspostava električnog luka kao i stabilnost istog bila je zadovoljavajuća. Mora se napomenuti da kvaliteta spojeva izvedenih pod vodom REL postupkom uvelike zavise o vještini zavarivača.
2. Vizualnim pregledom zavarenih spojeva prema normi AWS D3.6M:1999 ustanovljeno je da su zavareni spojevi izvedeni REL postupkom pravilne geometrije, bez uključaka troske, te da nema površinskih pora. Primjećuju se uzdužne pukotine u ZUT-u i MZ.
3. Ispitivanje penetrantima, pokazala se prisutnost uzdužnih pukotina u ZUT-u kod proba zavarenih unosom topline 12 i 15 kJ/cm, dok za unos topline od 18 kJ/cm pojavila se uzdužna pukotina u metalu zavora.
4. Analizom makrostrukture, uočene su dvije vrste nastanka pukotine. Pukotine koje nastaju u metalu zavora i pukotine koje nastaju u osnovnom materijalu, odnosno u ZUT-u. Tako veći unos topline omogućuje dulji vremenski period za izlazak, odnosno difuzije vodika iz zavarenog spoja.

5. Usporedbom koeficijenta pukotine  $H_c/H$  uočeno je povećanje koeficijenta kod uzorka 1 i uzorka 2 sa 70% na 90% kod uzorka 3, tj. povećanim unosom topline pukotina prelazi iz ZUT-a u MZ, a to dovodi do porasta duljine pukotine.
6. Tvrdća zavarenog spoja REL postupkom uglavnom je niža od granične, prema normi AWS D3.6M:1999 propisane vrijednosti od 375HV. U predjelu zone linije staljivanja, gdje vrijednosti tvrdoće dosežu najviše vrijednosti, zavareni spoj načinjen REL podvodnim mokrim postupkom i unosom topline od 18 kJ/cm, uspoređivajući sa razinama unosa topline od 12 i 15 kJ/cm, poprima vrijednosti tvrdoće niže za otprilike 10%. Razlike u tvrdoći uglavnom su uzrokovane zbog višeg unosa topline kod REL postupka, tako da se zavareni spoj duže hladio i nije došlo do zakaljivanja u toj mjeri kao što je došlo kod prva dva unosa topline.

Ovaj rad na osnovu provedenih ispitivanja zavarenih spojeva dokazuje da je moguće vrlo uspješno zavarivati podvodnim mokrim REL postupkom čelike API 5L X70, postupkom koji zadovoljava svaki uvjet po pitanju norme AWS D3.6M:1999 B-klasa. Međutim, potrebna su daljnja istraživanja, naročito pozornost treba posvetiti optimalizaciji parametara s obzirom na tehniku rada te odabiru dodatnog materijala, s ciljem minimaliziranja rizika od pojave hladnih pukotina koje se javljaju ukoliko se primjenjuju neadekvatni parametri.

TEKKEN metoda može se primjeniti za ocjenu sklonosti nastanka hladnih pukotina, međutim potrebno je u obzir uzeti specifičnosti mokrog podvodnog zavarivanja.

## 6. LITERATURA

- [1] Krnić N.: "Podvodno zavarivanje – gdje hrvatska vidi sebe u odnosu na svijet" Zbornik radova: "Strategija razvoja zavarivanja u Hrvatskoj", HDTZ, Opatija 1993., 98-119 str.
- [2] Garašić I.: "Priprema FASTRoot tehnologije za zavarivanje podmorskog plinovoda između Norveške i Velike Britanije", Zavarivanje 50, 1/2, 2007., str. 83.
- [3] Anzulović B., Krnić N.: "Zavarivanje i rezanje pod vodom – naše mogućnosti" Zbornik radova: "Zavarivanje u brodogradnji", HDTZ, Split 1986.; 186-196 str.
- [4] Bal M.: "Neki problemi kvalitete spojeva zavarenih pod vodom" Zbornik radova: "Zavarivanje u brodogradnji", HDTZ, Split 1986.
- [5] Mihailescu D., Constantin V., Iordachescu D., Mihailescu A.: "GMAW torches for special processes", Zbornik radova: "Development of welding and allied processes at beginning of the new millenium", Cavtat – Dubrovnik, 2001., HDTZ, 653-658 str.
- [6] Kralj S., Kožuh Z., Garašić I.: "Podvodno mokro zavarivanje i podvodno ispitivanje u održavanju pomorskih objekata", <http://www.fsb.hr>
- [7] ..... "Specification for Underwater Welding"; AWS D3.6M: 1999
- [8] ..... "RESEARCH REPORT 105"; Review of the performance of high strength steels used offshore, Prepared by Cranfield University for the Health and Safety Executive 2003.
- [9] T. Filetin, F Kovačiček, J. Indof: "Svojstva i primjena materijala", Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2002.

- [10] Kralj S., Kožuh Z., Garašić I.: "Utjecaj vodonepropusnog premaza na karakteristike , zavarenih spojeva načinjenih u morskoj vodi", Zbornik radova: "Development of welding and allied processes at beginning of the new millenium", Cavtat – Dubrovnik, 2001.,HDTZ 557-562 str.
- [11] Sterken F. H.: "Praškom i metalom punjene žice, alternativa za obložene elektrode i pune žice", Zbornik radova: "Dodatni i pomoćni materijali za zavarivačke i srodne tehnike", Poreč, 1996., HDTZ, 51-61 str.
- [12] Winkler F.: "Primjena suvremenih praškom punjenih žica za navarivanje površina podvrgnutih trošenju", Zbornik radova: "Zavarivanje i srodni postupci u održavanju konstrukcija", Zagreb 1988., HDTZ, 31-49 str.
- [13] Štular P.: "Razvoj praškom punjenih žica za elektrolučno zavarivanje, u svijetu i Sloveniji", Zbornik radova: "Dodatni i pomoćni materijali za zavarivačke i srodne tehnike", Poreč, 1996., HDTZ, 31-49 str.
- [14] Salopek Z.: "Uporaba plina pri zavarivanju – niskoaktivne plinske mješavine", Zbornik radova: "Development of welding and allied processes at beginning of the new millenium", Cavtat – Dubrovnik, 2001.,HDTZ.; 453-460 str.
- [15] Bültmann F., Stroka U.: "Novi razvoj u primjeni zaštitnih plinova prema standardu DIN EN 439", Zbornik radova: "Norme i njihova primjena u zavarivanju i srodnim postupcima", Rovinj 2000., HDTZ, 159. str.
- [16] Garašić Ivica: "Osjetljivost čelika X70 na hladne pukotine pri mokrom podvodnom zavarivanju", doktorski rad, Zagreb 2008., <http://www.fsb.hr>
- [17] Kralj S., Sikirić V., "Zavarljivost visokočvrstih čelika"  
Zavarivanje 45(2002) 3/4, 91-96
- [18] Kralj S., Dunder M., "Ispitivanje sklonosti zavarenih spojeva čelika 25CrMo4 i Ck45 prema nastajanju hladnih pukotina", Zavarivanje 43(2000) 1/2 5-16



- [19] Kralj S., Samardžić I. : "Pregled metoda ispitivanja sklonosti prema nastanku hladnih pukotina", Zavarivanje 35, 5-6, 199-208, 1992
- [20] .....Lincoln procedure handbook of arc welding, 13. poglavlje  
14. izdanje 2000., Cleveland, Ohio.
- [21] Hrivnjak I., "Zavarljivost čelika", Beograd, 1982.
- [22] Hillenbrand H.-G., Gräf M., Kalwa C.: "Development and production of high strength pipeline steel" Niobium 2001, December 02-05, 2001, Orlando, Florida, USA
- [23] Khulka K., Aleksandrov S.: "Promising tube steels for gas pipelines", Metallurgist, Vol. 50, Nos. 3-4, 2006.
- [24] Nosochenko A.O., Matrosov Yu.I., Ganoshenko I.V., Nazarov A.V., Volodarskii V.V.: "PROPERTIES OF PEARLITE-FREE PIPE STEEL OF TYPE 0.03C-1.5Mn-0.09Nb IN STRENGTH CLASS X65-X70"  
Metallurgist, Vol. 47, Nos. 11-12, 2003.
- [25] Marzoli I., "Underwater welding for offshore pipelines", IIW-Doc. XI-591-92, 1992.
- [26] Akselsen O.M., Fostervoll H., Hårsvær A., Aune R., "Weld metal mechanical properties in hyperbaric GTAW of X70 pipeline, International Journal of Offshore and Polar Engineering", Vol.16, No. 3, pp 233-240, 2006.
- [27] Richards B., "Wet underwater welding - a real alternative", IIW Doc. XII-1870-05, 2005.
- [28] Cooper M.A., "Some aspects of underwater engineering-Ministry of Defence 1995-2003", IIW-Doc. XII-1874-05, 2005.
- [29] ..... "Underwater pipeline repair at world's largest LNG plant, Underwater contractor international", ISSN 1362-0487, Issue 3, Volume 11, pp 23, 2007.

- [30] Billingham J., Sharp J.V., Spurrier J., Kilgallon P.J., "Review of the performance of high strength steels used offshore", ISBN 0 7176 2205 3, Research report 105, Cranfield, 2003.
- [31] Woodward N.J., Yapp D., Richardson I. M., Widgery D., Armstrong M.A.P., Verley R.L.P., Berge J.O., "Subsea Pipeline Repair-Diverless GMA welding using fillet welded sleeve", IIW-Doc. XII-1868-05.
- [32] Woodward N.J., D. Yapp, I.M. Richardson, D. Widgery, M.A.P. Armstrong, R.L.P. Verley, J.O. Berge, "Retrofit Tee Hot Tapping using Diverless Underwater GMA Welding", IIW-Doc. XII-1898-06.
- [33] Parvu M., "Welding technology to repair by socket welding an underwater gas pipeline", Sudura, Vol. XVI-2, pp 5-13, 2006.
- [34] [www.lastek.eu](http://www.lastek.eu)
- [35] Nosochenko A.O., Matrosov Yu.I., Ganoshenko I.V., Nazarov A.V., Volodarskii V.V.: "Properties of pearlite-free pipe steel of pipe 0.03C-1.5Mn-0.09Nb in strength class X65-X70", Metallurgist, Vol. 47, Nos. 11-12, pp 491-498, 2003.
- [36] Dunne D. P.: Doktorski rad, The University of Wollongong, May 2003.
- [37] Woodward N.: "Developments in Diverless Subsea Welding", Welding Journal October, 2006.
- [38] Nevasmaa P.: "Predictive model for the prevention of weld metal hydrogen cracking in high-strength multipass welds" Faculty of Technology, University of Oulu, Linnanmaa, November, 2003.
- [39] Boellinghaus Th., Viyanit E., Zimmer P.: "Cold cracking tests-revision" IIW-Doc. No II-A-111-03-Revision6, 2003.
- [40] Franc M.: "Mehanička svojstva materijala", Zagreb, 2005.

- [41] Juraga I., Ljubić K., Živčić M.: "Pogreške u zavarenim spojevima", Zagreb, 2000.
- [42] Smojver A.: "Podvodno zavarivanje u otežanim uvjetima"  
Zbornik radova "Zavarivanje u pomorstvu" 1998.; 116-127 str.
- [43] Kralj S., Kožuh Z., Garašić I.: "Stanje i trendovi u razvoju podvodnog zavarivanja"  
Zavarivanje 48, 5/6, 2005., str. 153-165.
- [44] <http://www.cdu.navy.mil/>, Službena web stranica U.S. NAVY
- [45] <http://www.weldreality.com>
- [46] <http://www.geocities.com/uhexso/dvrworks.html>
- [47] [www.pagesbydave.com/divepics/](http://www.pagesbydave.com/divepics/)
- [48] [www.lochsdiving.net/services.html](http://www.lochsdiving.net/services.html)
- [49] <http://www.hollanddivingint.com/photoalbum.htm>
- [50] [www.europadiving.co.uk/welding.htm](http://www.europadiving.co.uk/welding.htm)
- [51] [http://www.thefabricator.com/ArcWelding/ArcWelding\\_Article.cfm?ID=1977](http://www.thefabricator.com/ArcWelding/ArcWelding_Article.cfm?ID=1977)
- [52] [www.lufesa.com](http://www.lufesa.com)
- [53] <http://www.offshore-technology.com>
- [54] [www.diversacademy.com](http://www.diversacademy.com)
- [54] [www.sfsb.hr](http://www.sfsb.hr)